



DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**GERENCIAMENTO DE RECURSOS HÍDRICOS EM BACIAS
HIDROGRÁFICAS: MODELAGEM AMBIENTAL COM A
SIMULAÇÃO DE CENÁRIOS PRESERVACIONISTAS**

ANDERSON LUIS RUHOFF

PPGG

**Santa Maria, RS
2004**

**GERENCIAMENTO DE RECURSOS HÍDRICOS EM BACIAS
HIDROGRÁFICAS: MODELAGEM AMBIENTAL COM A
SIMULAÇÃO DE CENÁRIOS PRESERVACIONISTAS**

ANDERSON LUIS RUHOFF

Dissertação de Mestrado apresentada ao
Programa de Pós-Graduação em Geomática
– Área de Concentração: Sensoriamento Remoto –
da Universidade Federal de Santa Maria,
como requisito parcial para obtenção do título de
MESTRE EM GEOMÁTICA

PPGG

**Santa Maria, RS
2004**

**Universidade Federal de Santa Maria
Centro de Ciências Rurais
Programa de Pós-Graduação em Geomática**

A Comissão Examinadora, abaixo assinada,
aprova a Dissertação de Mestrado

**GERENCIAMENTO DE RECURSOS HÍDRICOS EM BACIAS
HIDROGRÁFICAS: MODELAGEM AMBIENTAL COM A SIMULAÇÃO DE
CENÁRIOS PRESERVACIONISTAS**

elaborada por
Anderson Luis Ruhoff

como requisito parcial para obtenção do título de
Mestre em Geomática

COMISSÃO EXAMINADORA

Rudiney Soares Pereira (UFSM)
Presidente / Orientador

Bernardo Sayão Penna e Souza (UFSM)

Enio Giotto (UFSM)

Santa Maria, RS
2004

RUHOFF, Anderson Luis, 1980 -

R933g

Gerenciamento de recursos hídricos em bacias hidrográficas: Modelagem ambiental com a simulação de cenários preservacionistas / Anderson Luis Ruhoff; Orientador Rudiney Soares Pereira. – Santa Maria: UFSM, 2004.
xiv, 93 f. : il.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Maria, 2004.

1. Geomática 2. Geoprocessamento 3. Planejamento Ambiental 4. Hidrologia
5. Erosão de Encostas 6. Modelagem Ambiental I. Pereira, Rudiney Soares
Pereira. II. Título.

CDU: 528.7/.9

Ficha Catalográfica elaborada por:
Luiz Marchiotti Fernandes CRB – 10/1160
Biblioteca Setorial do Centro de Ciências Rurais da Universidade Federal de Santa Maria

Reprodução Proibida. Art. 184 do Código Penal e Lei n°. 9610, de 19 de Fev. de 1998.

Direitos Autorais Reservados
© Anderson Luis Ruhoff, 2004

COORDENAÇÃO Rudiney Soares Pereira
EDIÇÃO DE TEXTO Anderson Luis Ruhoff
COMUNICAÇÃO CARTOGRÁFICA Anderson Luis Ruhoff
EDIÇÃO DE ARTE E PROJETO GRÁFICO Anderson Luis Ruhoff
FINANCIAMENTO Fundo Setorial de Recursos Hídricos
INFRA-ESTRUTURA Laboratório de Geomática (UFSM)
IMPRESSÃO E ACABAMENTO Universidade Federal de Santa Maria

www.ufsm.br

Impresso no Brasil

2004

Dedicatória

Dedico esse estudo ao meu
querido irmão Gustavo Henrique,
exemplo de superação.

Agradecimentos

Talvez essa seja apenas uma maneira formal de agradecer àquelas pessoas que realmente participaram da construção dessa dissertação de mestrado. Agradeço profundamente a todos que participam diariamente de minha vida. Mas algumas pessoas, realmente merecem essa menção. Todos meus familiares, em especial minha mãe Margaret, que sempre me incentivou, e nunca deixou de acreditar no meu potencial. A minha namorada Vanessa, minha inspiração pessoal e profissional, meu grande amor...

Ao meu orientador, professor Rudiney, que, além de um profissional extremamente comprometido com a qualidade da educação e da pesquisa na UFSM, mostrou-se um grande amigo. Agradeço também a Comissão de Avaliação, representada pelos professores Bernardo Sayão Penna e Souza e Enio Giotto.

Agradeço também aos meus colegas de profissão, professores, e aos meus alunos, da UFSM, do Decisão Pré-Vestibular e da Rede Cipel.

Ah!, não poderia esquecer os amigos... Os amigos que compartilham, que discutem, que cativam, que fazem festa, que participam, que esperam, que acreditam, que passam. Simples amigos, que se eternizam e que fazem a vida valer a pena.

Também não poderia deixar de mencionar a importância de algumas instituições públicas, como a Universidade Federal de Santa Maria, o Ministério da Ciência e Tecnologia (através do fundo Setorial de Recursos Hídricos) e o Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico).

A todas outras pessoas, as quais não me referi, mas que certamente também participaram da consolidação de mais essa conquista. Meu muito obrigado!

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	ix
LISTA DE TABELAS	xi
RESUMO	xii
ABSTRACT	xiv
1. INTRODUÇÃO	1
2. COORDENADAS DOS MAPAS INVESTIGATIVOS	7
3. PERFIL SÓCIO-AMBIENTAL DA BACIA DO ARROIO GRANDE	12
4. O PLANEJAMENTO AMBIENTAL ASSISTIDO POR GEOPROCESSAMENTO	18
4.1. ARQUITETURA DE SISTEMAS DE INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS	19
4.1.1. <i>Modelagem de Dados Geográficos</i>	19
4.1.2. <i>Classes de Dados Geográficos</i>	21
4.1.3. <i>Análise Espacial de Dados Geográficos</i>	23
4.1.4. <i>Referências de Programação em LEGAL</i>	29
4.2. PERSPECTIVAS EM SENSORIAMENTO REMOTO	29
4.2.1. <i>O Processamento Digital de Imagens</i>	29
4.2.2. <i>Influência dos Efeitos Atmosféricos em Sensoriamento Remoto</i>	30
4.2.3. <i>Índice de Vegetação por Diferença Normalizada</i>	31
4.2.4. <i>Segmentação e Classificação de Imagens</i>	34

5. OS RECURSOS HÍDRICOS NO CONTEXTO DA GESTÃO AMBIENTAL	46
5.1. A INTERFACE DA GESTÃO DA ÁGUA E A QUESTÃO AMBIENTAL	46
5.2. POLÍTICAS INSTITUCIONAIS DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS HÍDRICOS NO BRASIL	49
5.3. ESTUDOS DE MODELAGEM HIDROLÓGICA	52
6. OS PROCESSOS EROSIVOS E A VULNERABILIDADE AMBIENTAL	63
6.1. PROCESSOS EROSIVOS NA INTERFACE COM OS RECURSOS NATURAIS	64
6.2. A EQUAÇÃO UNIVERSAL DE PERDAS DE SOLOS	66
<i>6.2.1. Fator R – Índice de Erosividade das Chuvas</i>	67
<i>6.2.2. Fator K – Fator de Erodibilidade dos Solos</i>	67
<i>6.2.3. Fator LS – Fator Topográfico</i>	69
<i>6.2.4. Fator CP – Uso e Cobertura da Terra e Práticas Conservacionistas</i>	69
<i>6.2.5. Avaliações das perdas de solos na Bacia do Arroio Grande</i>	71
6.3. O PROCESSO DE VULNERABILIDADE AMBIENTAL DAS UNIDADES ECODINÂMICAS	74
7. ÁGUA: GERENCIAR PARA NÃO FALTAR	80
7.1. DINÂMICAS DE USO E COBERTURA DA TERRA	80
7.2. O FEEDBACK DO CICLO HIDROLÓGICO	83
7.3. CONSIDERAÇÕES FINAIS	84
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	86

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 – Localização da Bacia do Arroio Grande no Rio Grande do Sul	17
Figura 3.2 – Mapa Geológico da Bacia do Arroio Grande	17
Figura 3.3 – Mapa de Solos da Bacia do Arroio Grande	17
Figura 3.4 (A) – Índices de precipitação mensal na Bacia do Arroio Grande para o ano de 2002	17
Figura 3.4 (B) – Índices de precipitação máxima contínua mensal na Bacia do Arroio Grande para o ano de 2002	17
Figura 3.5 – Mapa Clinográfico da Bacia do Arroio Grande	17
Figura 4.1 – Componentes de um Sistema de Informações Geográficas	43
Figura 4.2 – Diagrama de VENN com as possibilidades de operações <i>booleanas</i>	43
Figura 4.3 – Diagrama de VENN ilustrando as diferenças entre fronteiras <i>booleanas</i> e fronteiras <i>fuzzy</i>	43
Figura 4.4 – Composição falsa-cor de imagens LANDSAT 5 <i>TM</i> com correções atmosféricas para o ano de 1987	44
Figura 4.5 – Composição falsa-cor de imagens LANDSAT 7 <i>ETM</i> com correções atmosféricas para o ano de 1987	44
Figura 4.6 – Comparação do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada	43
Figura 4.7 – Índice de Vegetação por Diferença Normalizada da Bacia do Arroio Grande para o ano de 1987	44
Figura 4.8 – Índice de Vegetação por Diferença Normalizada da Bacia do Arroio Grande para o ano de 2002	44
Figura 4.9 – Índices de precipitação e temperatura da Bacia do Arroio Grande para os anos de 1987 e 2002	44
Figura 4.10 – Representação de uma imagem multiespectral no espaço de atributos (A), no processo de classificação (B) e no mapa temático (C)	45

Figura 4.11 – Mapeamento de uso e cobertura da terra na Bacia do Arroio Grande para o ano de 1987	45
Figura 4.12 – Mapeamento de uso e cobertura da terra na Bacia do Arroio Grande para o ano de 2002	45
Figura 4.13 – Evolução florestal da Bacia do Arroio Grande entre os anos de 1987 e 2002	45
Figura 4.14 – Evolução agrícola da Bacia do Arroio Grande entre os anos de 1987 e 2002	45
Figura 5.1 – Distribuição da água do Planeta	62
Figura 5.2 – Principais componentes do ciclo hidrológico em superfície de bacias hidrográficas	62
Figura 5.3 – Destino das águas no ciclo hidrológico	62
Figura 5.4 – Destino da água precipitada e retida na superfície terrestre	62
Figura 6.1 – Perda anual de solos na Bacia do Arroio Grande	79
Figura 6.2 – Zoneamento e fragilidade ambiental das unidades ecodinâmicas	79
Figura 6.3 – Cenário preservacionista com áreas de reflorestamentos prioritários	79

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Dados utilizados no mapeamento da Bacia do Arroio Grande	10
Tabela 3.1 – Classes de solos e seus significados genéricos	13
Tabela 3.2 – Indicadores sociais dos municípios de Itaara e Silveira Martins	15
Tabela 4.1 – Escala de valores AHP para comparação pareada	26
Tabela 4.2 – Etapas do processamento digital de imagens	29
Tabela 4.3 – Dados de uso e cobertura da terra na Bacia do Arroio Grande para os anos de 1987 e 2002	35
Tabela 4.4 – Uso e cobertura da terra por microbacia do Arroio Grande para o ano de 1987	37
Tabela 4.5 – Uso e cobertura da terra por microbacia do Arroio Grande para o ano de 2002	38
Tabela 4.6 – Mudanças de uso e cobertura da terra na Bacia do Arroio Grande entre os anos de 1987 e 2002	40
Tabela 4.7 – Evolução florestal da Bacia do Arroio Grande entre os anos de 1987 e 2002	40
Tabela 4.8 – Evolução agrícola da Bacia do Arroio Grande entre os anos de 1987 e 2002	41
Tabela 5.1 – Áreas prioritárias para financiamento de ações pelo CT Hidro	52
Tabela 5.2 – Balanço hídrico da Bacia do Arroio Grande	55
Tabela 5.3 – Balanço hídrico em áreas florestais da Bacia do Arroio Grande	56
Tabela 5.4 – Balanço hídrico em áreas de campos/pastagens da Bacia do Arroio Grande	58
Tabela 5.5 – Balanço hídrico em áreas agrícolas da Bacia do Arroio Grande	59
Tabela 5.6 – Volume de água perdida em excesso e áreas a florestar na Bacia	

do Arroio Grande	60
Tabela 6.1 – Fator de erodibilidade dos tipos de solos	68
Tabela 6.2 – Valores de uso e cobertura da terra – Fator <i>C</i>	70
Tabela 6.3 – Valores de <i>P</i> para alguns tipos de manejos de solos	70
Tabela 6.4 – Valores de <i>C</i> e <i>P</i> para a Bacia do Arroio Grande	71
Tabela 6.5 – Volume total de perdas de solos na Bacia do Arroio Grande	73
Tabela 6.6 – Importância das classes de declividades nos processos erosivos	75
Tabela 6.7 – Importância dos tipos de solos na ocorrência dos processos erosivos	75
Tabela 6.8 – Importância da cobertura vegetal nos processos erosivos	76
Tabela 6.9 – Importância das formações geológicas nos processos erosivos	76
Tabela 6.10 – Zoneamento Ambiental da Bacia do Arroio Grande	77
Tabela 6.11 – Reflorestamentos propostos para a Bacia do Arroio Grande	77
Tabela 7.1 – Relação entre o uso e cobertura da terra, perdas de água e solos na Bacia do Arroio Grande	83

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE CIÊNCIAS RURAIS**

**Programa de Pós-Graduação em Geomática
Dissertação de Mestrado**

**Gerenciamento de Recursos Hídricos em Bacias Hidrográficas:
Modelagem Ambiental com a Simulação de Cenários Preservacionistas**

Resumo

O presente estudo teve como objetivo implementar e realizar uma simulação computacional numérica do escoamento superficial da água e dos processos erosivos, transformando um Sistema de Informações Geográficas em uma representação realista dos processos espaço-temporais, para avaliar os riscos de processos erosivos na bacia do Arroio Grande. Através do processo de Modelagem Ambiental, busquei criar um cenário preservacionista que contemplasse a redução do escoamento superficial da água e dos processos erosivos. Para a criação deste cenário, analisei as transformações espaciais ocorridas na Bacia do Arroio Grande entre o período de 1987 a 2002. Este estudo insere-se nas atividades previstas pelo Fundo Setorial de Recursos Hídricos (CT Hidro), através do gerenciamento de recursos hídricos em bacias na Região Sul do Brasil. Uma das áreas prioritárias estabelecidas pelo CT Hidro é a de Uso e Conservação dos Solos e Sistemas Hídricos, em que os principais problemas são a erosão e compactação do solo, perda de cobertura natural e reflorestamentos inadequados. Com isso, o programa objetiva subsidiar o desenvolvimento de práticas conservacionistas e preservação dos recursos hídricos das bacias hidrográficas. Entre os principais resultados, destaco a grande relação entre escoamento superficial e os processos erosivos, sendo que aproximadamente 46,32% do total de água precipitada na bacia é perdida. O elevado volume de escoamento superficial arrasta consigo 437.000 toneladas de solos férteis por ano, em uma média de 12,36 ton/ha. Dados obtidos com o processo de modelagem ambiental indicam que a área a ser reflorestada deve ser de 4.500 hectares. Destaco também algumas mudanças nos padrões de uso e cobertura da terra, que evidenciam a inserção da Bacia do Arroio Grande em um sistema de elevada exploração econômica.

Palavras-Chave

Geoprocessamento, Planejamento Ambiental, Hidrologia, Erosão de Encostas, Modelagem Ambiental.

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE CIÊNCIAS RURAIS**

**Programa de Pós-Graduação em Geomática
Dissertação de Mestrado**

**Water resources management: Environmental modeling with a
preservationist scenario simulation**

Abstract

The present study had the objective to implement a numeric computer simulation of the superficial flow of water and of the erosive processes, transforming a geographic information system into a realistic system of the time-space processes to analyze the risks of environmental hazards of the Arroio Grande watershed. Through the environmental modeling process, I tried to create a preservationist scenario, which focused the reduction of the superficial water flow and the erosive process. With this scenario I analyzed the spatial changes happened on the Arroio Grande watershed in the period of 1987 to 2002. This study fits in the activities predicted by the Fundo Setorial de Recursos Hídricos (CT Hidro), through the managing of the hydric resources in South Brazil. One area establish by CT Hidro is the land use and cover changing and soil conservation at water systems where the main problems are the soil erosion and soil compaction, loses of the natural cover and improper reforestation. With that, the program tries to provide the development of conservationist practices and the prevention of the water sources at watersheds. Between the results I point the great relation of the superficial water flow and the erosive processes, being approximately 46,32% of the total of the water that enters in the basin is lost. The high superficial flow carries 437.000 tons of fertile soil per year in a average of 12,36 tons/ha. The data obtained by the process of environmental modeling show the need to reforest an area of 4.500 hectares. I also point out some changes in the patterns of the land cover's usage, which put in evidence the insertion of Arroio Grande watershed in a highly economic exploration system.

Keywords

GIS, Environmental Planning, Hydrology, Hazard Erosion, Environmental Modeling.

1. INTRODUÇÃO

A falta de água será o tema dos grandes debates mundiais do século XXI, pois a água foi um dos últimos recursos naturais que passou a ser discutido frente à crise ambiental que se instalou no âmbito internacional. É um problema que afeta a maioria dos países africanos, começa a ameaçar países europeus, e “aparentemente” não ameaça o Brasil, que é considerado uma potencia hídrica.

Mas se nosso país possui água de sobra, esta se encontra mal distribuída e mal utilizada. Devido a grande disponibilidade e abundância, este recurso nunca foi motivo de preocupação por parte da população, das autoridades, dos governos, pois sempre houveram mananciais hídricos à disposição do homem.

Desde o início de sua história, o homem estabeleceu-se em locais com grande disponibilidade de água, como por exemplo, na civilização egípcia – ao longo do crescente fértil do rio Nilo, e na civilização mesopotâmica – próxima aos rios Tigre e Eufrates. O sucesso dessas sociedades esteve intimamente vinculado aos seus rios, que propiciavam a formação de terras férteis e possibilitavam grandes colheitas agrícolas mesmo que em terras bastante áridas. Ao mesmo tempo, a escassez de água decretava o padecimento de diversas sociedades, como no continente africano. A monopolização deste recurso sempre causou diversos conflitos, impossibilitando em muitas vezes, próprio desenvolvimento dessas sociedades.

O nosso planeta, azul ao ser visto do espaço, passa a impressão de apresentar uma quantidade ilimitada de água e deste ser um recurso inesgotável. Mas a água é um recurso tão precioso, e da mesma maneira, limitado, tanto que nos últimos anos passou a ser denominado de *Ouro Azul*.

Durante o Século XX ocorreram diversas transformações sociais, políticas, econômicas e ambientais, principalmente devido ao avanço tecnológico e científico. E o meio ambiente foi explorado de maneira predatória numa tentativa de extrair os maiores benefícios à sociedade humana. Os recursos hídricos, tidos pela sociedade como inesgotáveis, foram utilizados de maneira bastante intensa, o que acabou impondo o uso múltiplo e sustentável da água.

A mobilização na gestão dos recursos hídricos ocorreu principalmente devido ao crescimento econômico e populacional. A partir da década de 1950, houveram grandes investimentos em industrialização e urbanização, o que levou ao início da crise ambiental, como resultado da degradação das condições de vida da população e dos sistemas naturais.

Surgiram então, idéias como desenvolvimento sustentável e gestão de recursos naturais. Com a busca pelo equilíbrio entre crescimento socioeconômico e conservação ambiental, tornou-se clara a necessidade do aproveitamento dos recursos naturais se dar de forma integrada, com usos múltiplos. O uso sustentável da água tem suscitado grande preocupação, pois este recurso é considerado como uma das bases do desenvolvimento da sociedade moderna. Muitos são os desafios que se relacionam à busca de soluções sustentáveis para problemas como: escassez e/ou excesso de água, deterioração da qualidade da água e principalmente com a percepção inadequada da sociedade para com os recursos hídricos.

Até a década de 1970, os resultados da ação humana sobre o meio ambiente eram vistos sob a ótica estrita da escala local, como em trechos de rios e áreas agrícolas. Atualmente, os problemas ambientais começam a ser considerados na escala de bacia hidrográfica, e até em nível regional e global.

No Brasil, a gestão ambiental de recursos hídricos iniciou-se praticamente com a aprovação da legislação nacional de recursos hídricos,

em 1997 e pela implantação de um sistema nacional de gerenciamento desses recursos, tendo em vista principalmente o controle da poluição urbana e agrícola das águas. O processo de institucionalização está sendo marcado pela regulamentação da legislação que pressupõem a cobrança pelo uso e pela poluição gerada, por meio de comitês de bacias hidrográficas.

A situação é bastante delicada no Brasil. Mesmo possuindo aproximadamente 12% do total de água potável¹ disponível no planeta Terra, e tendo o rio Amazonas e o Aqüífero Guarani, duas entre as maiores fontes de água no mundo², o Brasil peca, principalmente no desperdício e no descaso em relação à água. As situações mais comuns são a poluição dos recursos hídricos, principalmente por indústrias, áreas urbanas e por atividades agrícolas com excesso de defensivos e práticas de manejo inadequadas. Os problemas ambientais mais comuns que se observam decorrem principalmente pelo acúmulo de lixo em drenagens urbanas, desflorestamentos em áreas agrícolas, enchentes e cheias em períodos de chuvas intensas, e secas e estiagens em períodos prolongados sem precipitações.

Tal situação levou o Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) juntamente com o Ministério da Ciência e Tecnologia (C & T) e o Ministério do Meio Ambiente (MMA) do Governo Federal brasileiro a criar o Fundo Setorial de Recursos Hídricos³, com o intuito de estimular programas e pesquisas científicas capazes de promover a defesa e preservação da água em nosso país. Nesse sentido, desenvolvi⁴ uma proposta de pesquisa para um estudo de caso no Rio Grande do Sul, em que contemplei uma das áreas prioritárias estipuladas pelo *CT Hidro*⁵ – *Uso e Conservação do Solo e de Sistemas Hídricos*. Os problemas mais comuns salientados são a erosão e sedimentação do solo, perda de cobertura natural e reflorestamentos inadequados. Os objetivos estabelecidos pelo programa visam desenvolver práticas de ocupação e aproveitamento do espaço, com conservação do solo e dos sistemas hídricos.

No Rio Grande do Sul, os problemas mais comuns ocorrem em áreas agrícolas, e se verificam casos de escassez de água em bacias que possuem elevadas taxas de ocupação agrícola. Esta situação decorre

principalmente pelo grande volume de água perdido – escoado superficialmente e subsuperficialmente – durante as chuvas e pela utilização em irrigação de lavouras agrícolas. A solução para esses tipos de conflitos requer aumento da eficiência dos sistemas de irrigação, gerenciamento dos efluentes agrícolas e conservação dos solos, que mal conservado é fonte de poluição difusa.

Para desenvolver uma proposta diretamente ligada à recursos hídricos, elegi como área de estudo de caso, a Bacia do Arroio Grande, na região central do Estado do Rio Grande do Sul. E, para contemplar os objetivos propostos pelo *CT Hidro*, elaborei um programa de gerenciamento dos recursos hídricos nessa bacia, avaliando a relação entre o uso da terra e a disponibilidade de água, baseando-me nas idéias de Modelagem Ambiental, desenvolvidas por *Lamblin (1994)*. O objetivo proposto foi implementar e realizar uma simulação computacional numérica do escoamento superficial da água e dos processos erosivos, transformando um Sistema de Informações Geográficas em uma representação realista dos processos espaço-temporais, tendo como base formulações teóricas propostas por autores como *Ward e Elliot (1995)*, *Bertoni e Lombardi Neto (1985)*, *Burrough e McDonnell (1998)*, *Kersten et al (1997)*, *Righetto (1998)* e *Ross (1994)*.

A proposta de gerenciamento de recursos hídricos foi então dividida em três objetivos específicos, que se referem a: 1) avaliar a demanda hídrica, estipulando o volume de água infiltrado, evapotranspirado e escoado superficialmente; 2) avaliar os processos erosivos em encostas e volume de solos perdidos, abordando a erosão causada pela água oriunda do escoamento superficial e subsuperficial; e 3) projetar um cenário preservacionista, com base na vulnerabilidade do sistema ambiental, em que serão estipuladas áreas para reflorestamento prioritário.

Para contemplar estes objetivos, estruturei essa dissertação em capítulos, nos quais foram abordados os aspectos teórico-conceituais e práticos referentes à gestão de recursos hídricos.

O Capítulo 2 – *Coordenadas dos Mapas Investigativos* – apresenta a metodologia de pesquisa e as coordenadas teóricas que foram seguidas para obter e analisar os resultados.

No Capítulo 3 – *Perfil Sócio-Ambiental da Bacia do Arroio Grande* – são apresentadas informações temáticas específicas referentes à Bacia Hidrográfica do Arroio Grande, como dados climatológicos e hidrológicos, geomorfológicos e geológicos, dados de solos, dados de uso e ocupação da terra e informações socioeconômicas. Através destes dados, torna-se possível realizar estudos de planejamento ambiental, e conseqüentemente, definir normas e planos mais adequados de ocupação de bacias hidrográficas.

No Capítulo 4 – *O Planejamento Ambiental assistido por Geoprocessamento* – são apresentados métodos de gestão e planejamento ambiental implementados através de tecnologias como Sensoriamento Remoto e Sistemas de Informações Geográficas. Apresento os resultados obtidos com o mapeamento do uso e cobertura da terra nos anos de 1987 e 2002, e suas alterações espaciais. A partir dessas informações são discutidos os processos de Modelagem Ambiental a partir de Bancos de Dados Geográficos e da Análise Espacial.

No Capítulo 5 – *Os Recursos Hídricos no Contexto da Gestão Ambiental* – são discutidas algumas questões para fundamentar teoricamente o gerenciamento e planejamento de recursos hídricos, apresentando informações sobre o ciclo hidrológico e a modelagem de sistemas ambientais. Também são discutidas as políticas nacionais de meio ambiente e recursos hídricos, com ênfase nos reflexos da gestão desses recursos, enfatizando também problemas conceituais que são extremamente importantes.

No Capítulo 6 – *Os Processos Erosivos e a Vulnerabilidade Ambiental* – são discutidas questões referentes aos processos erosivos e a perda de solos, causados principalmente pelo escoamento superficial da água, enfatizando também a relação entre erosão e vulnerabilidade do sistema ambiental, para, dessa maneira fundamentar uma proposta de elaboração de cenários preservacionistas.

O Capítulo 7 – *Água: Gerenciar para Não Faltar* – apresenta os resultados obtidos e algumas discussões integradas, com propostas de implementação da modelagem ambiental na Bacia do Arroio Grande.

Assim, a arquitetura desta pesquisa permite-me posicionar informações teóricas e aspectos conceituais junto aos resultados práticos obtidos com a aplicação das metodologias. A estratégia utilizada na fundamentação teórica permite validar os resultados obtidos, fundamentando-os com informações de outras pesquisas, realizadas por diversos autores. As notas adicionais explicativas encontram-se localizadas no final de cada capítulo. Tal posicionamento permite ao leitor conferir explicações mais detalhadas, bem como obter informações sobre outros autores e idéias não explícitas no texto.

¹ Os dados são fornecidos pelo Ministério do Meio Ambiente (Brasil) e disponibilizados no endereço www.mma.gov.br.

² Segundo dados da Agência Nacional das Águas (www.ana.gov.br), o Rio Amazonas possui uma vazão de 140 mil m³ por segundo de água doce, e o Aquífero Guarani possui uma disponibilidade de 45 trilhões de m³, dos quais aproximadamente 70% encontram-se em território brasileiro.

³ O Programa *CT Hidro* foi criado em 2000 com a finalidade de fomentar as atividades de ciência e tecnologia voltadas para o conhecimento, proteção, uso sustentável e gestão de recursos hídricos.

⁴ Justifico a escolha do “Eu” por permitir me posicionar, mais positivamente, de forma diferente ao mesmo tempo em relação ao objeto de estudo e ao saber. *Brosseau (1999)* esclarece que o “Eu” constitui, de uma certa maneira, uma crítica do “Nós” genérico através do qual se constrói a neutralidade do sujeito científico. O autor também afirma que ao “Eu” pode corresponder uma maior liberdade em relação à sobriedade dos cânones discursivos da cientificidade.

⁵ Os principais objetivos do Programa *CT Hidro* podem ser encontrados no *site* oficial da Agência Nacional das Águas (www.ana.gov.br) ou mais especificamente em http://www.ana.gov.br/gestaoRecHidricos/TecnologiaCapacitacao/tecnologia_projetos_cthidro2.asp.

2. COORDENADAS DOS MAPAS INVESTIGATIVOS

Tendo apresentado no Capítulo 1 – *Introdução* – as motivações e argumentos que me possibilitaram desenvolver esta problematização, abordo agora a metodologia de pesquisa e as estratégias de investigação que privilegiei para discutir algumas questões referentes à gestão de recursos hídricos.

Minha dissertação insere-se em um campo geográfico de pesquisa que não possui um espaço teórico-conceitual bem definido, pois a “Ciência da Geoinformação¹” não apresenta um alicerce disciplinar edificado. Uma base epistemológica que estrutura os estudos em Geoprocessamento é a Geografia Quantitativa ou Teorética, que utiliza modelos na análise dos sistemas geográficos. *Monteiro et al (2001)* salientam que esses modelos são validados por métodos e técnicas estatísticas.

Atualmente, a Tecnologia de Geoprocessamento enfatiza a representação de fenômenos espaciais de forma estática. No entanto, um grande conjunto de fenômenos espaciais são inerentemente dinâmicos e as representações estáticas em Sistemas de Informação Geográfica não as capturam de forma adequada. Cito uma afirmação de *Burrough (1986)*, que transmite a idéia das limitações do Geoprocessamento: *Os limites desenhados em mapas temáticos raramente são precisos, e desenhá-los como linhas finas muitas vezes não representa seu caráter. Assim, talvez não nos devemos preocupar tanto com localizações exatas e representações gráficas.*

Harvey (1989) faz críticas no sentido de que a Geografia Quantitativa, apesar dos resultados obtidos com a análise espacial, não consegue explicar os processos socioeconômicos subjacentes, nem capturar o componente das ações e intenções dos agentes sociais. A compreensão do espaço-tempo subverte a lógica previsível de organização do espaço e estabelece um substancial desafio conceitual para sua representação.

A partir dessa concepção, proponho então, utilizar outros olhares e abordagens para compreender e analisar o espaço geográfico, como a teoria do *espaço de fluxos e o espaço de lugares*², proposto por Manuel Castells (1999). O autor se refere a “espaços de geometria variável” para explicar que, em muitas vezes as articulações materiais entre agentes econômicos e sociais ocorrem de forma independente da contigüidade física.

Então, os desafios são bastante consideráveis, como afirmam Monteiro et al (2001) principalmente no sentido de combinar modelos dinâmicos de interação espacial e compreender a relação causal entre os agentes sociais e os processos socioeconômicos. Os autores ainda comentam que a modelagem computacional dos fenômenos sociais não pode ser reduzida à premissa de que é possível derivar modelos matemáticos que descrevam o comportamento dos agentes sociais.

Nesta pesquisa, examino a relação entre o escoamento superficial e os processos erosivos desencadeados pela ocupação da Bacia Hidrográfica do Arroio Grande. Não existe nenhuma metodologia referente a avaliações de tal processo, porém existem diversos métodos que analisam e concebem, de maneira individual o escoamento superficial e os processos erosivos. Nessa perspectiva, utilizo algumas abordagens propostas por autores, como Garcia (2001), Ward e Elliot (1995) e Ross (1994), para, em conjunto, abordar meu objeto de estudo.

A modelagem hidrológica foi realizada com base em estudos propostos por Garcia (2001), através da metodologia intitulada *Florestamentos Compensatórios para Retenção de Água em Bacias Hidrográficas*. Esse método estipula o volume de água infiltrado, evapotranspirado e escoado superficialmente em bacias hidrográficas.

Os processos erosivos foram estudados com base na *Equação Universal de Perdas de Solos* (USLE), que fornece, através de métodos empíricos, o volume de solos perdidos por ano. Os processos erosivos em encostas foram avaliados e analisados por equações estipuladas inicialmente por *Wischmeyer e Smith (1978)*³, e posteriormente aperfeiçoadas por diversos autores como *Bertoni e Lombardi Neto (1985)* e *Ward e Elliot (1995)*. A aplicação desta fórmula ocorreu através de álgebra de mapas em Sistemas de Informação Geográfica, em que as matrizes numéricas são multiplicadas entre si, apresentando então os resultados para cada unidade territorial básica.

Relacionando os processos erosivos à modelagem hidrológica, procurei elaborar um cenário preservacionista, com o intuito de propor algumas medidas de conservação e recuperação ambiental, para reduzir a intensidade dos processos erosivos e o volume de água escoado superficialmente. Utilizo então a proposta *Análise Empírica da Fragilidade Ambiental dos Ambientes Naturais e Antropizados*, elaborada por *Jurandy Ross (1994)*, que estabelece a vulnerabilidade ambiental de unidades ecodinâmicas. A metodologia de análise que utilizei corresponde a Inferência de Dados Geográficos, denominada de Inferência *Fuzzy* – Processo Analítico Hierárquico (AHP)⁴.

O material empírico para subsidiar as análises é constituído de imagens do satélite LANDSAT 5 *Thematic Mapper* e LANDSAT 7 *Enhanced Thematic Mapper*, modelos numéricos do terreno e cartas topográficas. A **Tabela 2.1** apresenta os dados utilizados na pesquisa e algumas informações de caráter relevante. Os dados de uso e cobertura da terra foram obtido pelo processamento digital das imagens do satélite LANDSAT, nas quais apliquei algumas técnicas que permitem extrair informações mais fiéis de uso e cobertura da terra. As técnicas aplicadas correspondem à correção atmosférica e a segmentação, que auxiliaram a classificação final dos dados.

Imagens LANDSAT			
Sensor	Sistema de Referência	Data	Fonte
TM 5	WRS 223-080	15/03/1987	GLCF ⁹ - NASA
ETM 7	WRS 223-080	15/03/2002	GLCF - NASA

Modelo Numérico do Terreno		
Resolução Espacial	Eqüidistância	Fonte
90 metros	30 metros	SRTM ⁹ - NASA

Cartas Topográficas		
Nome/Código	Escala	Fonte
Santa Maria	1:50.000	DSG – Exército Brasileiro
Camobi	1:50.000	DSG – Exército Brasileiro
Silveira Martins	1:50.000	DSG – Exército Brasileiro

Tabela 2.1 – Dados utilizados no mapeamento da Bacia do Arroio Grande.

De posse dos resultados individuais obtidos com a aplicação das diversas metodologias empregadas, procurei analisar estes de uma maneira integrada, problematizando a ação dos agentes sociais e suas implicações socioeconômicas. A modelagem dinâmica seguiu a proposição de *Lamblin (1994)*, indagando a evolução de um sistema ambiental ao longo do tempo:

1. Quais variáveis ambientais e culturais contribuem para explicar o fenômeno, e quais são os processos ecológicos e sócio-econômicos existentes por trás deste fenômeno?
2. Como o processo evoluiu?
3. Onde ocorrem os fenômenos?

Tentando achar respostas para essas questões e indagações, redigi os capítulos seguintes e estruturei minhas considerações sobre a gestão de recursos hídricos em bacias hidrográficas.

¹ Monteiro et al (2001) definem como *Ciência da Geoinformação* as questões relacionadas com as tecnologias de Sistemas de Informações Geográficas e Geoprocessamento, tendo um caráter de natureza interdisciplinar, pois para esta área convergem diversos campos do conhecimento, como Geografia, Informática, Engenharia, Ciências Ambientais, Estatística, entre outras. Nessa concepção, não existe nenhuma base epistemológica definida para o Geoprocessamento, mas um conjunto de conceitos teóricos e aplicações genéricas independentes para cada área de conhecimento.

² Castells (1999) expõem a idéia de *espaços de fluxos e lugares* no sentido de representar os arranjos espaciais, numa interação definida pela própria condição de moradia das pessoas e sua lógica. Esses espaços também são arranjos conforme o determinante das relações de poder e das movimentações de circulação de bens e serviços, gerando assim uma “esquizofrenia estrutural” da lógica espacial.

³ Apud Ward e Elliot (1995).

⁴ No Capítulo 4 – *O Planejamento Ambiental assistido por Geoprocessamento* – explico os processos teóricos de análise espacial (álgebra de mapas e inferência geográfica) e processamento digital de imagens de Sensoriamento Remoto.

⁵ O programa *Global Land Cover Facility* é uma parceria entre a Universidade de Maryland (Estados Unidos) e a NASA (*National Aeronautics and Space Administration*) que distribui imagens do Satélite LANDSAT de qualquer parte do globo terrestre para instituições conveniadas.

⁶ SRTM – Sigla da *Shuttle Radar Topographic Mission*, que mapeou toda a superfície terrestre em três dimensões com radar interferométrico de abertura sintética (InSAR), fornecendo mapas topográficos de todo o globo terrestre com resoluções entre 30 e 90 metros e precisão absoluta menor que 10 metros. Foi realizada em parceria pelos Estados Unidos (NASA – JPL) e Alemanha (DLR) em Fevereiro de 2000. Maiores informações ou detalhes podem ser obtidos em Einender et al (2002).

3. PERFIL SÓCIOAMBIENTAL DA BACIA DO ARROIO GRANDE

A Bacia do Arroio Grande localiza-se na região central do Estado do Rio Grande do Sul, na Microrregião Geográfica de Santa Maria, situando-se em grande parte nos municípios de Silveira Martins e Itaara¹. A bacia possui uma área de 35.359,52 hectares e encontra-se entre o Planalto Meridional Brasileiro e a Depressão Periférica Sul-Rio-Grandense. A **Figura 3.1** apresenta a Bacia do Arroio Grande e sua localização no Estado do Rio Grande do Sul.

Na bacia encontram-se a Formação Aluvionar, Formação Botucatu, Formação Rosário do Sul e Formação Serra Geral (Basaltos e Riólitos). Segundo o *IBGE (1986)*, a Formação Aluvionar é formada por areias e cascalheiras em planícies de inundação e terraços da rede hidrográfica atual e sub-atual. *Maciel Filho (1990.)* salienta que a Formação Botucatu apresenta solos residuais e arenosos, com permeabilidade alta e processos erosivos intensos em solos residuais e baixos em solos litificados. A Formação Rosário do Sul apresenta, segundo o *IBGE (1986)*, características de deposição em ambiente fluvial, consistindo em arenitos bastante finos, de baixa permeabilidade, o que acaba proporcionando uma maior proteção dos solos. A Formação Serra Geral (Basaltos), conforme *Maciel Filho (1990)* apresenta solos litólicos constituídos por fragmentos basálticos, de baixa estabilidade nos taludes, e com intensos movimentos de massa (rastejos e corridas de terra durante chuvas intensas); apresentando permeabilidade fissural. *Maciel Filho (1990)* ainda salienta que a Formação Serra Geral (Riólitos) possui comportamento semelhante

ao Basalto Serra Geral. A **Figura 3.2** apresenta as formações geológicas encontradas na Bacia do Arroio Grande.

Segundo a classificação de solos do Rio Grande do Sul, proposto por *Streck et al (2002)*, em conformidade com as normas estabelecidas pela EMBRAPA, podem ser encontrados na Bacia do Arroio Grande, os seguintes solos²: 1) *Planossolo Hidromórfico* (SGe1); 2) *Argissolo Vermelho Distrófico Arênico* (PVd2); 3) *Alissolo Hipocrômico Argilúvico* (APt2); 4) *Associação Chernossolo Argiluvico Férrico – Neossolo Litólico Eutrófico Chernossólico* (MTf – RLe1); 5) *Argissolo Vermelho Amarelo Alumínico* (PVAa3); e 6) *Argissolo Vermelho Amarelo* (PVAa1).

A **Tabela 3.1** apresenta as classes de solos e os significados genéricos de cada tipo de solo. A **Figura 3.3** apresenta os principais tipos de solos encontrados na Bacia do Arroio Grande.

Ordens	Significado Genérico
Alissolo	Alto teor de Alumínio
Argissolo	Horizonte subsuperficial argiloso
Chernossolo	Solos escuros com alta fertilidade química
Neossolo	Solos novos em formação
Planossolo	Solos planos

Tabela 3.1 – Classes de Solos e seus significados genéricos.

Fonte: *Streck et al (2002)*.

O regime climático é constituído por precipitações basicamente regulares todo ano (não há estações secas definidas), sendo que as chuvas que ocorrem na região são essencialmente de origem frontal (frentes polares) que se deslocam sobre o Rio Grande do Sul, e esporadicamente formadas por frentes quentes (frentes tropicais).

Conforme dados da Estação Meteorológica da Universidade Federal de Santa Maria, durante o ano de 2002, a precipitação foi de 2691,4 mm, e a média mensal foi de 224,3 mm. Os meses com menores índices de precipitação foram de Fevereiro e Janeiro, com 101,1 e 111,8 mm, respectivamente. A **Figura 3.4 (A)** apresenta o volume de precipitação mensal durante o ano de 2002. A Estação Meteorológica também registrou eventos chuvosos com máxima duração contínua, sendo que estes

ocorreram em Outubro, com 101,8 mm. Os eventos mínimos ocorreram em Janeiro, com 33 mm. A **Figura 3.4 (B)** apresenta o volume de precipitação contínua máxima mensal para o ano de 2002.

O clima associado aos fatores litológicos e pedológicos da área cria condições francamente favoráveis à erosão da área. Em solos com pouca cobertura vegetal, as chuvas exercem uma forte ação mecânica na zona do rebordo do Planalto. A grande velocidade de escoamento superficial provocado pelas elevadas declividades, conforme a **Figura 3.5**, permite à água transportar grandes quantidades de materiais erosivos, que se depositam em áreas mais planas, causando o empobrecimento dos solos e o assoreamento dos cursos d'água.

O enquadramento fitogeográfico da Bacia do Arroio Grande, segundo estudos de *Brena e Longhi (2002)*, corresponde principalmente às florestas estacionais decíduais. As florestas são tipicamente ombrófilas, que avançaram sobre os campos, resquícios de um clima árido e frio, e sobre as matas de araucárias. Revestindo toda a encosta sul do Planalto Rio-grandense, encontra-se uma floresta densa, de caráter estacional, tipicamente conhecida por Mata Atlântica.

A floresta é caracterizada por uma grande densidade de indivíduos, com estratos que variam desde espécies herbáceas até espécies com mais de 30 metros. *Brena e Longhi (2002)* ainda salientam que ocorrem na área espécies comuns das formações secundárias, todas especializadas na colonização de clareiras. Dentro da área, as espécies florestais encontram-se distribuídas conforme a aptidão dos ambientes naturais. Três tipos de formações podem ser encontrados: I) Formações Aluviais; II) Formações Submontanas, compreendendo terrenos ondulados e dissecados; e III) Formações Montanas, abrangendo áreas com altitudes superiores a 400 metros.

A ocupação da Bacia do Arroio Grande iniciou-se a partir da metade do Século XIX, com a entrada de imigrantes italianos³. A ocupação foi intensificada a partir de 1890, com o aumento das atividades agrícolas e comerciais, estando ligadas à extração de madeira e cultivo agrícola. A partir da ocupação por esses grupos, a região adotou alguns aspectos

particulares, como a policultura e o predomínio de pequenas propriedades rurais⁴.

Segundo dados do *IBGE@Cidades (2004)*, o município de Silveira Martins localiza-se na bacia e apresenta densidade populacional de 22,5 hab/km, e leve predomínio de população rural, com aproximadamente 56% do total. Os principais produtos cultivados são feijão, milho e soja, destacando-se também a extração de madeira. O município de Itaara apresenta densidade populacional de 26,54 hab/km², e leve predomínio de população rural. A **Tabela 3.2** apresenta as principais características sociais e econômicas dos municípios de Silveira Martins e Itaara⁵.

Informações Sociais	Itaara	Silveira Martins
População residente - 1991	3.709 Hab.	2.380 Hab.
População residente - 2000	4.578 Hab.	2.751 Hab.
Residentes urbanos	3.315 Hab.	1.044 Hab.
Residentes rurais	1.263 Hab.	1.527 Hab.
Área municipal	172,45 Km ²	122,65 Km ²
Densidade Populacional	26,55 Hab./Km ²	22,5 Hab./Km ²

Produção Agrícola Temporária		
Cebola	2 Hectares	70 Hectares
Feijão	150 Hectares	340 Hectares
Fumo	7 Hectares	50 Hectares
Milho	750 Hectares	750 Hectares
Soja	1.400 Hectares	800 Hectares
Trigo	105 Hectares	10 Hectares

Extração Vegetal e Silvicultura		
Extração Madeira - Lenha	12.550 m ³	10.265 m ³
Extração de Madeira - Toras	1.259 m ³	2.280 m ³

Tabela 3.2 – Indicadores sociais dos municípios de Itaara e Silveira Martins.
Fonte: *IBGE@Cidades (2004)*.

Nas áreas de várzea foi desenvolvida a cultura do arroz irrigado. Mas o forte da produção agrícola, segundo *Itaqui (2002)*, permaneceu nas encostas das serras até meados de 1950 – 1960. Essa realidade somente mudou com o acesso a mecanização agrícola e às novas tecnologias difundidas pela “Revolução Verde”.

Em 1994, os remanescentes da Mata Atlântica e ecossistemas associados foram reconhecidos pela Organização das Nações Unidas para a Educação e Cultura (UNESCO) como integrantes da Reserva da Biosfera da Mata Atlântica Brasileira⁶.

¹ A Bacia Hidrográfica do Arroio Grande também se apresenta localizada no município de Santa Maria, e, nesta área há uma intensa exploração orizícola.

² Maiores informações sobre os tipos de solos podem ser obtidos em *Streck et al (2002)*.

³ O processo de colonização da região pode ser aprofundado em *Itaqui (2002)*. Segundo o autor, o atual município de Silveira Martins foi o berço irradiador da cultura italiana na região central do Rio Grande do Sul.

⁴ A policultura era representada pelo cultivo de grãos, frutas, verduras e outros produtos agrícolas da dieta alimentar da região e do estado. As pequenas propriedades rurais eram características da imigração italiana e alemã.

⁵ Conforme dados do Censo 2000.

⁶ Segundo *Itaqui (2002)*, no Rio Grande do Sul, foram selecionadas três áreas-piloto. A Quarta Colônia de Imigração Italiana foi eleita uma destas áreas, com o objetivo de manter a diversidade biológica dos remanescentes florestais, por meio de desenvolvimento de projetos específicos de preservação e recuperação ambiental conjugados com a identidade histórico-cultural e socioeconômica regional.

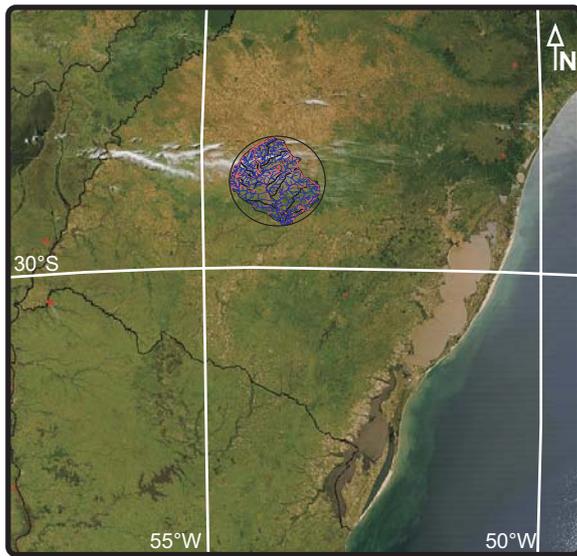


Figura 3.1

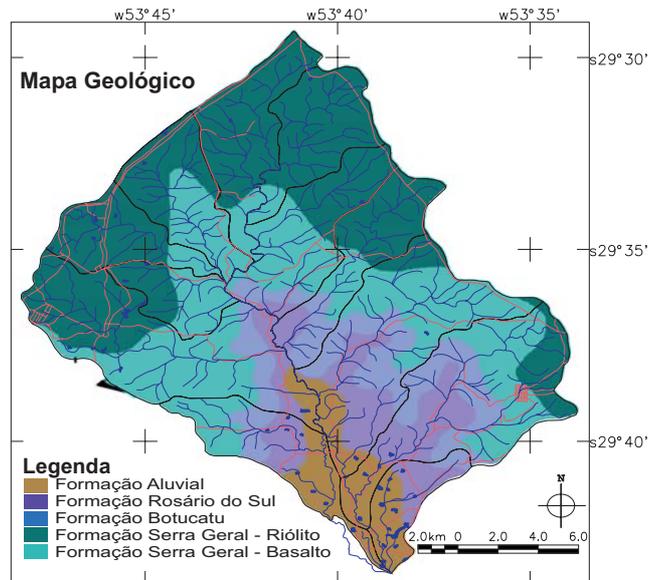


Figura 3.2

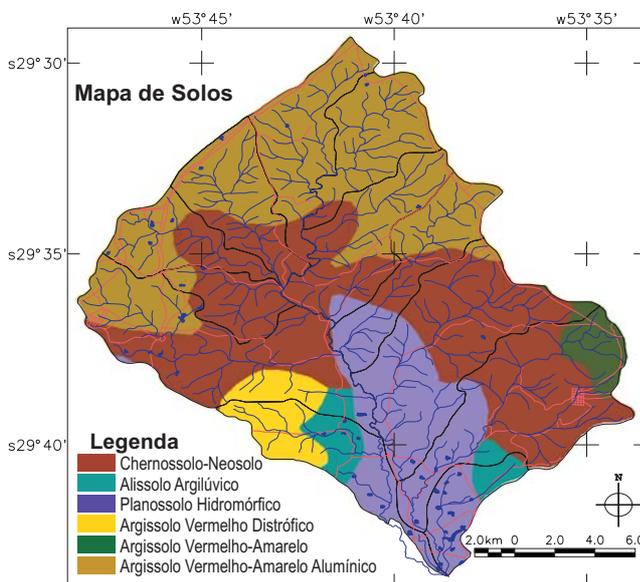


Figura 3.3

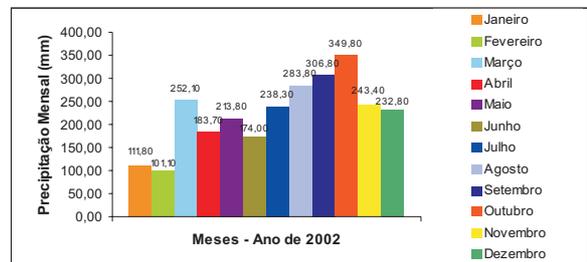


Figura 3.4 (A)

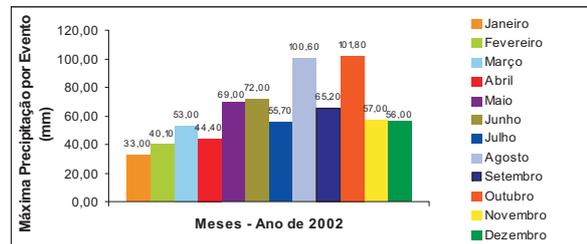


Figura 3.4 (B)

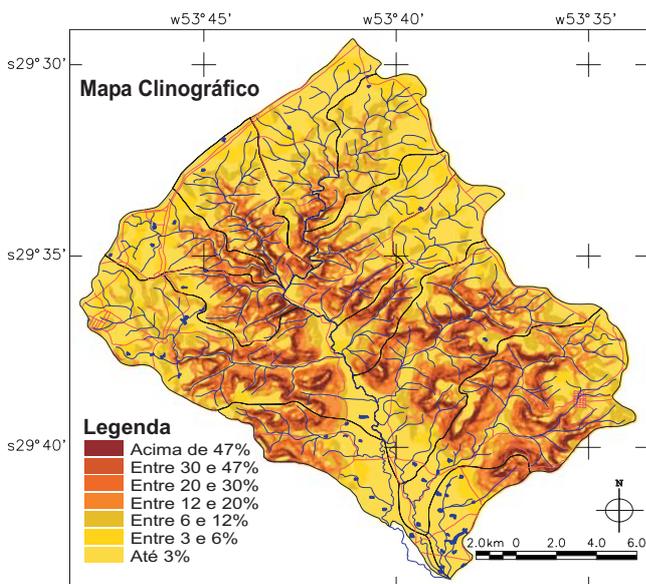


Figura 3.5

Figura 3.1 - Localização da Bacia do Arroio Grande no Estado do Rio Grande do Sul.

Figura 3.2. - Mapa Geológico da Bacia do Arroio Grande (Escala original 1:50.000 e 1:750.000).
Fonte: Maciel Filho (1990) e IBGE (1986).

Figura 3.3 - Mapa de Solos da Bacia do Arroio Grande (Escala original 1:750.000).
Fonte: IBGE (1986) e Streck (2002).

Figura 3.4 (A) - Índices de precipitação mensal na Bacia do Arroio Grande para o ano de 2002.
Fonte: Estação Meteorológica da Universidade Federal de Santa Maria.

Figura 3.4 (B) - Índices de precipitação máxima contínua mensal na Bacia do Arroio Grande para o ano de 2002.
Fonte: Estação Meteorológica da Universidade Federal de Santa Maria.

Figura 3.5 - Mapa Clinográfico da Bacia do Arroio Grande.
Fonte: Shuttle Radar Topography Mission (2003).

4. O PLANEJAMENTO AMBIENTAL ASSISTIDO POR GEOPROCESSAMENTO

Termos como Gestão e Planejamento Ambiental ganharam grandes destaques nas ciências ambientais frente às crises que estão assolando o Planeta Terra. Não pretendo discutir aqui qual o significado dos termos gestão e planejamento ambiental, mas como estes podem se beneficiar de tecnologias como Sensoriamento Remoto e SIG's. Mas de que forma o Geoprocessamento pode auxiliar a gestão e o planejamento ambiental? Tentando elaborar algumas considerações acerca dessa questão, redigi os parágrafos seguintes.

Baseei-me em termos comuns entre Geoprocessamento e Planejamento Ambiental, como espaço e tempo. Todo e qualquer ambiente se caracteriza por uma localização espacial e por um processo dinâmico (que ocorre no tempo), sendo que as variáveis ambientais se modificam ao longo do tempo e do espaço. Um aspecto inerente ao planejamento ambiental é a questão da espacialidade, que é um dos *conceitos-chave* do Geoprocessamento.

O termo planejamento ambiental, de uma maneira generalizada, abrange uma gama de atividades, porém todas se relacionam com a tomada de decisões, envolvendo um conjunto de pesquisas e decisões fundamentadas em um referencial teórico. *Christofoletti (1998)* frisa que o principal aspecto inerente ao planejamento ambiental é a questão da espacialidade, pois incide na implementação de atividades em um

determinado território. Constitui, portanto, num processo de avaliação das características ambientais, do funcionamento e da dinâmica das organizações espaciais.

A Gestão Ambiental, implementada e institucionalizada pelas conferências mundiais sobre o meio ambiente, conforme *Lanna (1995)*, é um processo de articulação das ações dos diferentes agentes sociais que interagem em um determinado espaço, para garantir a adequação dos meios de exploração dos recursos naturais às especificidades do meio ambiente, com base em diretrizes estabelecidas. *Lanna (op. cit.)* ainda salienta que a Gestão Ambiental é implementada por: I) Políticas Ambientais; II) Planejamento Ambiental; e III) Gerenciamento Ambiental.

Através do planejamento ambiental, é estabelecida a adequação da utilização dos recursos naturais, o controle e a proteção do meio ambiente. Com o gerenciamento ambiental, regula-se na prática, o uso, o controle, a proteção e a conservação dos recursos naturais, estabelecidas pelas políticas ambientais.

Para tanto, este capítulo está estruturado em duas seções distintas, em que abordo a arquitetura de Sistemas de Informações Geográficas (organização e manipulação de dados geográficos) e o Sensoriamento Remoto, com perspectivas centradas no processamento digital de imagens e na extração de informações espaciais que possam ser utilizadas em SIG's.

4.1. ARQUITETURA DE SISTEMAS DE INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS

4.1.1. Modelagem de Dados Geográficos

Sistemas de Informações Geográficas, segundo *Câmara et al (1997)*, são sistemas automatizados usados para armazenar, analisar e manipular

dados geográficos, ou seja, dados que representam objetos e fenômenos em que a localização geográfica é uma característica inerente à informação e indispensável para analisá-la (Aronoff, 1989; Bull, 1994).

Este capítulo conceitua, de uma forma geral, o que são sistemas de informações geográficas, como estes são estruturados e arquitetados, e como podem ser extraídas e geradas novas informações para subsidiar e embasar a análise espacial.

Em uma visão abrangente, um SIG possui os seguintes componentes: I) Interface com o Usuário; II) Entrada e manipulação de dados; III) Funções de processamento, visualização, armazenamento e recuperação de dados (Aronoff, 1989). Cada sistema, em função de seus objetivos e necessidades, implementa esses componentes de formas distintas, mas todos estão presentes em um SIG, relacionados conforme a **Figura 4.1**.

Um banco de dados com informações geográficas é um repositório de informações coletadas sobre o mundo real (Goodchild et al, 1992; Engenhofer, 1995). Uma das formas de armazenar as informações geográficas é organiza-las em um Sistema de Gerenciamento de Bancos de Dados (SGBD) relacional. Segundo Câmara et al (1997), a estratégia consiste em dividir as informações em camadas (*layers*) funcionalmente complexas, e ortogonalmente em subsistemas especializados em determinados tipos de dados.

Um SIG implementado segundo uma estratégia de SGBD relacional utiliza tabelas para armazenar informações não-espaciais e dos objetos, e arquivos de coordenadas para a componente espacial destes (Câmara et al, 1997).

Para entender o processo de armazenamento dos dados, é necessário inicialmente caracterizar os dados geográficos a partir de três componentes fundamentais (Aronoff, 1989; Dangermond, 1990): I) Características não-espaciais, que descrevem o fenômeno estudado; II) Características espaciais, que informam a localização espacial do fenômeno através de propriedades geométricas e topológicas; III) Características temporais, identificando o tempo para o qual tais dados são considerados.

A modelagem de dados geográficos apresenta características espaciais, pois envolvem questões de representação segundo fatores técnicos. Isso consiste em dizer que podem existir diferentes representações para um mesmo objeto (*Chrisman, 1993*). Inicialmente, define-se o nível de abstrações do modelo de dados (*Câmara et al, 1997*): *Nível do Mundo Real* – contém os elementos da realidade geográfica a serem modelados; *Nível Conceitual* – comporta as ferramentas de modelagem dos dados, determinando quais classes serão criadas no SGBD; *Nível de Representação* – associa os dados geográficos identificados no nível conceitual às classes de representações, que variam conforme a escala, projeção e data de aquisição dos dados; *Nível de Implementação* – define padrões, formas de armazenamento e estruturas de dados para implementar as diferentes representações.

Dentro destes níveis de abstrações, os dados e objetos geográficos são representados em classes de dados geográficos, tais como mapas temáticos, mapas cadastrais, redes, modelos numéricos do terreno e imagens. A seção *Classes de Dados Geográficos* apresenta algumas discussões das principais classes de dados geográficos em Geoprocessamento, com base em autores como *Aronoff (1989)*, *Burrough e McDonnell (1998)* e *Chrisman (1997)*.

4.1.2. Classes de Dados Geográficos

Os *Mapas temáticos* são mapas que mostram uma região geográfica particionada em polígonos segundo valores relativos a um tema qualquer. Os *Mapas Cadastrais*, ao contrario, apresentam objetos identificáveis, utilizando-se uma representação topológica.

Esses dados são armazenados usando representações topológicas em que arestas determinam os limites entre regiões. *Câmara et al (1997)* frisa que a topologia construída é do tipo aresta-vértice-face, em que as

arestas se conectam entre si através de vértices e arestas que circundam uma área definem uma face.

A dicotomia de modelagem desses dados reflete-se no nível de representação, chamado de *Raster* ou *Vector* (Coulter, 1992). O nível de representação *Raster* estrutura-se em formato matricial, ou seja, em uma matriz cujos elementos são unidades poligonais regulares no espaço (células). A cada célula corresponde a um valor do dado geográfico representado.

Já um objeto geográfico no formato *Vector* é representado por pontos, linhas e polígonos. As linhas são formadas por seqüências de pontos, e polígonos são formados por seqüências de linhas conectadas entre si. Relações topológicas permitem armazenar, associado a localização dos objetos, informações sobre relacionamentos de contigüidade e vizinhança dos elementos armazenados (Smith et al, 1987).

Em Geoprocessamento, o conceito de *Redes* denota as informações associadas a serviços de utilização pública, como água, luz, telefone, drenagens de bacias hidrográficas, rodovias. As informações são armazenadas em formas de grafos que fluem entre localizações geográficas distintas, utilizando-se de topologias arco-nós, em que os arcos possuem um sentido de fluxo e os nós representam conexões (Goodchild et al, 1992).

O termo *Modelo Numérico do Terreno* é utilizado para denotar a representação de uma grandeza que varia continuamente no espaço, sendo associado comumente a altimetria e declividade do terreno, mas também pode ser utilizado para outros mapeamentos. Entre os principais usos de Modelos Numéricos do Terreno, Burrough (1986) destaca: I) armazenamento de dados topográficos; II) Análise de variáveis geofísicas e geoquímicas; III) Apresentações tridimensionais, combinadas com outras variáveis.

Existem duas grandes formas de armazenamento de dados de MNT (Burrough e McDonnell, 1998): grades regulares e grades irregulares (também definidas como triangulares). As grades regulares são matrizes de elementos com espaçamento fixo, em que cada ponto geográfico é associado a um valor numérico. As grades irregulares triangulares (TIN – *Triangular Irregular Network*) são estruturas topológicas vetoriais do tipo

arco-nó, onde os nós são conectados formando triângulos que se sobrepõem e cobrem a área de estudo (Aronoff, 1989). Uma grade triangular é formada por conexões entre amostras, com distribuição espacial irregular, utilizando-se métodos de triangulações, como o *Delaunay* (Tsai, 1993).

Segundo Tsay (1993), as grades triangulares são normalmente melhores para representar as variações do terreno, pois capturam a complexidade do relevo sem a necessidade de uma grande quantidade de dados redundantes. As grades regulares possuem uma grande redundância de dados em terrenos uniformes e dificuldade de adaptações a relevos de natureza distinta, por causa da grade de amostragem fixa (Burrough e McDonnell, 1998).

Com o grande desenvolvimento na área de Sensoriamento Remoto, as imagens geradas por sensores instalados em satélites orbitais passaram a ser utilizadas em conjunto com SIG's, aliadas às técnicas de armazenamento, recuperação e processamento de imagens.

Uma Imagem, em princípio, é uma matriz de números digitais (*pixels*). Para uma representação de Imagens em um SIG, é necessário discretizá-la no espaço – amostragem, e na amplitude – quantização. A partir do processamento digital das imagens, pode-se obter mapas temáticos que apresentam classes como *Florestas* ou *Agricultura*.

4.1.3. Análise Espacial de Dados Geográficos

Esta seção apresenta algumas discussões sobre a recuperação, processamento e manipulação de dados geográficos, com o objetivo de gerar novas informações a partir dos Planos de Informação existentes. Portanto, são criadas novas informações que subsidiam e validam as discussões sobre a análise espacial de dados geográficos. Tal referencial teórico centra-se se em Burrough e McDonnell (1998), Aronoff (1995), Câmara et al (1997), Cordeiro et al (2001) e Monteiro et al (2001).

O que caracteriza um SIG são as funções que realizam análises espaciais, utilizando as informações geográficas armazenados na base de dados espaciais, e realizando simulações sobre os fenômenos do mundo real. Diversas são as possibilidades de análise espacial disponíveis em um SIG. Nesse sentido, busco discutir duas possibilidades: I) Álgebra de Mapas, e II) Inferência Geográfica.

O embasamento teórico para a Álgebra de Mapas apresenta uma grande gama de artigos sistematizando tais operações, com destaques para *Goodchild (1987)*, *Burrough e McDonnell (1998)* e *Dangermond (1991)*.

Conforme o domínio dos mapas de geo-campos, diferentes possibilidades podem ser consideradas, destacando-se as *operações booleanas*. Segundo *Barbosa et al (2001)*, as *operações booleanas* são utilizadas em análise espacial qualitativa e quantitativa, gerando um novo mapa, nas categorias temático ou numérico, a partir da aplicação de regras sobre os geo-campos (instanciações temático, numérico ou imagem). Tal operação permite aplicar entre outras, funções matemáticas, logarítmicas e trigonométricas e operações de contexto (lógica).

Burrough e McDonnell (1998) frisam que as *operações booleanas* são de fácil aplicação, com a combinação lógica de mapas, análoga ao processo de sobreposição de informações espaciais. O cruzamento de mapas pode ser resumido pelas operações, conforme *Burrough e McDonnell (1998)*: I) elementos contidos na intersecção entre A e B (A **and** B); II) elementos contidos exclusivamente em A (A **not** B); III) elementos contidos, tanto em A como em B (A **or** B); e, IV) elementos contidos em A e B, mas não incluídos na intersecção entre A e B (A **xor** B). A **Figura 4.2** apresenta um Diagrama de Venn, diferenciando as possibilidades de operações booleanas.

As operações matemáticas, segundo *Barbosa et al (2001)*, são especializações das categorias Numérico e Imagem, incluindo: 1) operações aritméticas, como soma, subtração, multiplicação e divisão; 2) funções matemáticas, como seno, co-seno, tangente, logaritmo, função exponencial, e raiz quadrada; e, 3) relações, tais como, menor que, maior que, menor ou igual que, maior ou igual que, igual, e diferente.

A importância desses procedimentos de análise espacial reside no fato de permitir a ligação de dados físicos e naturais e dados socioeconômicos, essencial para estudos de planejamento ambiental, como na determinação da vulnerabilidade e fragilidade aos processos erosivos, a partir das unidades da paisagem mapeadas de imagens de satélites.

Os principais problemas relacionados às *operações booleanas* são os limiares nítidos e rígidos, que nem sempre representam os fenômenos naturais corretamente. Nesse sentido, utilizo as considerações de *Burrough* e *McDonnell (1998)*, que na natureza os fenômenos não são representados por limites estáticos ou rígidos.

A partir dessas considerações, busquei outras metodologias de análise espacial, com o intuito de produzir novas informações que representassem, de uma maneira mais complexa, os fenômenos naturais. Para tanto, utilizei-me da Inferência *Fuzzy*, que tem como característica a indefinição de fronteiras ou limiares entre as classes (*Burrough e McDonnell, 1998*). A **Figura 4.3** ilustra a diferença de fronteiras entre os conjuntos *booleanos* e conjuntos *fuzzy*.

Para muitos pesquisadores (*Cox, 1994; Fang, 1997*), um benefício significativo dos modelamentos baseados em lógica *fuzzy* é a habilidade de codificação de conhecimentos inexatos, numa forma que se aproxima muito ao processos de decisão. Os sistemas de inferências baseados em lógica *fuzzy* possibilitam, assim, a captura do conhecimento próximo ao “modelo cognitivo” utilizado na análise de problemas. Isto significa que o processo de aquisição do conhecimento é mais fácil, mais confiável e menos sujeito a erros não identificados.

O conjunto *fuzzy*, segundo *Burrough e McDonnell (1998)*, é uma metodologia de caracterização de classes que não possuem, por várias razões, limites rígidos ou estáticos. Tais conjuntos lidam com conceitos inexatos, sendo indicado para estudos que apresentam ambigüidade, abstração e ambivalência em modelos matemáticos ou conceituais de fenômenos.

Burrough (1992) demonstra como as incertezas nos valores dos atributos dos mapas causam erros nos resultados das inferências espaciais efetuadas segundo modelamentos *booleanos* e *fuzzy*. Os resultados obtidos

por esse autor sugere que os métodos *booleanos* estão muito mais sujeitos à propagação de erros em modelamentos do que os equivalentes *fuzzy*, e que a utilização da técnica *fuzzy* pode reduzir drasticamente a propagação de erros através de modelos lógicos, fornecendo informações mais confiáveis.

Atualmente, existem vários operadores de inferência espacial para a integração de dados, dentre as quais destaco os modelos *Bayesiano*, Redes Neurais, Média Ponderada e o Processo Analítico Hierárquico. Utilizo-me da Inferência *Fuzzy* Ponderada (AHP), pela maior facilidade e simplicidade de modelagem, bem como uma melhor adaptação aos objetivos propostos por essa dissertação.

Um dos conceitos norteadores no suporte a decisão é o princípio de *racionalidade*. Para explicar a técnica AHP, utilizo como exemplo a processo de zoneamento ambiental proposto nessa dissertação. O zoneamento é estabelecido a partir de variáveis ambientais, como uso da terra (1), declividades (2), formações geológicas (3) e formações litológicas (4). Esses fatores são comparados entre si, conforme um critério de importância relativa atribuída as diversas classes temáticas e informações numéricas (conforme **Tabela 4.1**).

Nesse sentido, *Barbosa et al (2001)* comentam que os pesos de cada variável são calculados conforme os autovalores e autovetores da matriz de comparação pareada. Com base nessa comparação, a técnica AHP classifica e transforma os dados para um espaço de referência entre [0 e 1], ou seja, entre [0 e 100%]. Nesse sentido, obtenho, ao invés de um mapa temático com limites rígidos, uma superfície de decisão numérica que representa uma variação contínua (e. g.: da fragilidade ambiental). No exemplo, a superfície numérica de decisão permite-me construir um cenário que pode espelhar diferentes compromissos na tomada de decisões ambientais, privilegiando-se maior proteção ambiental ou otimizando a exploração econômica e agrícola (e. g.).

Intensidade de importância	Definição e Explicação
1	<i>Importância igual</i> – os dois fatores contribuem igualmente para o objetivo.
3	<i>Importância moderada</i> – um fator é ligeiramente mais importante que o outro.
5	<i>Importância essencial</i> – um fator é claramente mais importante que o outro.
7	<i>Importância demonstrada</i> – um fator é fortemente favorecido e sua maior relevância foi demonstrada na prática.
9	<i>Importância extrema</i> – a evidência que diferencia os fatores é da maior ordem possível.
2, 4, 6, 8	<i>Valores intermediários</i> – possibilidade de compromissos adicionais entre julgamentos.

Tabela 4.1 –Escala de valores AHP para comparação pareada.
Fonte: *Barbosa et al (2001)*.

Segundo CÂMARA *et al* (2001) o Processo AHP é uma teoria com base matemática que permite organizar e avaliar a importância relativa entre critérios e medir a consistência dos julgamentos. Requer a estruturação de um modelo hierárquico, o qual geralmente é composto por um processo de comparação pareada, por importância relativa, preferências e probabilidade, entre dois critérios.

4.1.4. Referências de Programação em LEGAL

Baseando-se nos modelos de dados e nos níveis conceituais de dados geográficos, o SPRING possui uma linguagem de consulta e manipulação espacial, denominada LEGAL (Linguagem Espacial para Geoprocessamento Algébrico), definida por *Câmara (1995)*.

A linguagem LEGAL provê um ambiente geral para análise geográfica, com operadores espaciais sobre geo-campos¹ e geo-objetos² existentes no banco de dados do SPRING, introduzidas pelo modelo conceitual (*Câmara, 1995*). Nessa programação são utilizados esquemas conceituais para definir especializações das classes do modelo de dados.

Um programa em LEGAL, conforme *Barbosa e Cordeiro (2001)* é estruturado em uma lista de sentenças que descrevem um procedimento, ou um conjunto de ações sobre dados espaciais. Tais sentenças são estruturadas em quatro grandes grupos (*Barbosa e Cordeiro, 2001*): I) *Declarações das Variáveis*; II) *Instanciações das Variáveis*; III) *Operações de Álgebra de Mapas*; e IV) *Comandos de Controle*.

Barbosa e Cordeiro (2001) ainda destacam os significados das sentenças descritas acima. As *declarações* definem variáveis que serão associadas aos dados fornecidos num programa. As *instanciações* são efetivamente associadas a Planos de Informações e correspondem a operações de dados existentes no SPRING, ou a criação de um novo dado representado em um Plano de Informação. As *operações* correspondem à aplicação de operadores sobre as variáveis declaradas e instanciadas, segundo regras gramaticais definidas. Cada sentença descreve uma operação de atribuição, que consiste em atribuir o resultado da avaliação de uma expressão algébrica a uma variável definida pelo programa. Os *comandos* de controle permitem o controle do fluxo de processamento do programa.

Cada sentença em LEGAL também envolve símbolos, como '{', '(', ')', '}', operadores, como '+', '*', '&&', '|'; palavras reservadas, como *Novo*, *Nome*, *Atribua*, *Pondere*; nomes de variáveis, como os modelos de dados disponíveis no SPRING; e nomes de itens, referentes aos Planos de Informação. Uma ampla gama de aplicações de programas em LEGAL e descrições mais detalhadas pode ser encontrados *no Manual do Usuário SPRING (INPE, 2004)*.

Discussões mais detalhadas sobre a recuperação e manipulação de dados geográficos, especialmente linguagens de consulta, abrange inúmeras referências como *Engenhofer (1989)* e *Câmara (1995)*.

4.2. PERSPECTIVAS EM SENSORIAMENTO REMOTO

O Sensoriamento Remoto de recursos naturais expressa a idéia de obter informações acerca destes através de um sistema composto por um sistema sensor, pela radiação eletromagnética e pelos alvos da superfície terrestre. Atualmente, o avanço tecnológico permite ao homem obter informações bastante detalhadas de diversos alvos que compõem a superfície terrestre.

Nesse sentido, resgato alguns conceitos teóricos, com o intuito de utilizar as tecnologias de Sensoriamento Remoto. Abordo então, principalmente, as técnicas de processamento digital de imagens. Diversos autores apresentam idéias semelhantes quanto ao processo de extração de informações a partir de imagens de satélites, dentre os quais destaco *Jensen (1996)*, *Crosta (1999)*, *Mather (1999)* e *Fonseca (2001)*.

4.2.1. O Processamento Digital de Imagens

A evolução da Tecnologia da Informação permitiu grandes avanços tecnológicos na manipulação de imagens digitais de sensoriamento remoto. O interesse do processamento digital de imagens surgiu da necessidade de se melhorar o aspecto visual destas, com os objetivos de facilitar a identificação e extração de informações (1); e, transformar a imagem, para aumentar o discernimento das informações (2).

De acordo com esses objetivos, *Jensen (1996)* estabelece diversas fases distintas de processamento, as quais são visualizadas na **Tabela 4.2**. Cada etapa tem o objetivo de realçar as informações contidas nas imagens, facilitando a posterior interpretação e análise. Porém, não é necessário que cada etapa seja rigorosamente cumprida, pois cada fase de processamento é estabelecida conforme os objetivos da aplicação, seja ela na Análise de Recursos Naturais, Meteorologia, Modelagem Ambiental, entre outras.

Etapa	Recursos Tecnológicos
Pré-processamento	1. Correção Atmosférica
	2. Correção Geométrica e Registro
	3. Realce de Contraste
Realce de Imagens	4. Filtragem
	5. Transformações IHS / RGB
	6. Operações Matemáticas
Análise de Imagens	7. Extração de Atributos
	8. Segmentação
	9. Classificação

Tabela 4.2 – Etapas do processamento Digital de Imagens.
Fonte: *Fonseca (2001)*.

Destaco nessa seção, os processos de correção atmosférica, as operações matemáticas entre bandas (dentre estas, o NDVI – *Normalized Difference Vegetation Index*), a segmentação e a classificação de imagens, pois foram as técnicas que utilizei para extrair dados de uso e cobertura da terra na Bacia do Arroio Grande nos anos de 1987 e 2002.

4.2.2. Influência dos Efeitos Atmosféricos em Sensoriamento Remoto

Durante o processo de aquisição das imagens, o sensor capta a refletância dos objetos. Como a radiação eletromagnética refletida atravessa a atmosfera até ser captada pelo sensor, ocorre a absorção e espalhamento dessa radiação, quando comparado aos valores originais de refletância. *Fonseca (2001)* salienta que o espalhamento atmosférico é o efeito mais sério, cuja magnitude é inversamente proporcional ao comprimento de onda.

Esse efeito é causado, conforme *Jensen (1996)*, pelas condições atmosféricas, como umidade relativa, visibilidade, temperatura, pressão atmosférica e gases e aerossóis, dentro os quais, destaco o Ozônio (O₃), e Gás Carbônico (CO₂). O método de correção atmosférica mais comum, segundo *Fonseca (2001)*, consiste em subtrair os valores digitais “mais baixos” presentes em uma imagem (geralmente áreas associadas a corpos d’ água ou sombreamentos de relevo) dos *pixels* restantes na imagem. Dessa maneira, a autora considera que os *pixels* encontrados nesses alvos sejam provenientes da contribuição aditiva da atmosfera. A **Figura 4.4** e a

Figura 4.5 apresentam as imagens em falsa-cor (Vermelho/Banda 5 – Verde/ Banda 4 – Azul/Banda 3) do Satélite LANDSAT 5 TM (1987) e LANDSAT 7 ETM+ (2002), respectivamente, com as correções atmosféricas.

4.2.3. Índice de Vegetação por Diferença Normalizada

A distribuição espacial e temporal da cobertura vegetal de uma região é fortemente influenciada por um conjunto de fatores ambientais incluindo condições climáticas, topográficas e outras propriedades associadas. Sendo a vegetação um indicador das condições ambientais dominantes (CO₂, ozônio, temperatura, ciclo hidrológico, etc.), as mudanças na sua dinâmica são um indicador útil das variações destas condições. A interação entre estes fatores ecológicos e a dinâmica da cobertura vegetal no tempo e no espaço é uma informação básica para várias ações de monitoramento ambiental e é fundamental para os sistemas de modelagem dos processos de interação com a atmosfera, tanto em escala regional quanto global.

O *Índice de Vegetação por Diferença Normalizada*, conhecido por NDVI, é uma aplicação dos processos de realce por operações matemáticas entre bandas. Segundo *Shimabukuro et al (1998)*, o NDVI é muito utilizado na estimativa de biomassa, na estimativa de cobertura vegetal e na detecção de mudanças de padrão de uso e cobertura da terra.

Jensen (1996) informa que o NDVI é dado pela [Equação 4.1]:

$$\text{NDVI} = (\text{NIR} - \text{R}) / (\text{NIR} + \text{R}) \quad \text{[Equação 4.1]}$$

em que:

NDVI = Índice de Vegetação por Diferença Normalizada;
NIR = Refletância no comprimento de onda correspondente ao Infra-Vermelho Próximo (0,76 a 0,90μm);

R = Refletância no comprimento de onda correspondente ao Vermelho (0,63 a 0,69 μ m).

O canal E/TM 3 e o canal E/TM 4 (do satélite LANDSAT) apresentam os valores de refletância nos comprimentos de onda do vermelho e infravermelho próximo, respectivamente. Com o aumento da cobertura vegetal a quantidade de vermelho refletido diminui, e aumenta a refletância na faixa de radiação do infravermelho.

A partir do NDVI é possível determinar a densidade de fitomassa foliar fotossinteticamente ativa por unidade de área (e. g., quanto maior este índice de vegetação, mais densa é a fitomassa verde). À medida que, conforme *Novo (1989)*, aumenta a quantidade de vegetação verde, aumenta a reflexão na banda do infravermelho próximo e diminui a reflexão na banda do vermelho fazendo com que o aumento da razão seja potencializado, realçando assim a vegetação. A **Figura 4.6** apresenta um exemplo de aplicação do NDVI, em um mesmo tipo de vegetação, porém que apresenta algumas alterações no índice de fitomassa fotossintética. Outro motivo de utilização do NDVI corresponde às correções potenciais da refletância em áreas afetadas por acidentes topográficos. Considerando que a iluminação solar possui a mesma inclinação, determinadas áreas apresentarão maiores influências do sombreamento topográfico. Com a aplicação do NDVI, as respostas espectrais em áreas sombreadas e iluminadas apresentarão valores espectrais similares (para áreas homogêneas), ou seja, há uma correção da equalização de iluminação solar. Nesse sentido, o NDVI é considerado como um pré-requisito para a classificação temática das imagens, pois este nos fornece noções de uso e cobertura da terra e as respectivas alterações no tempo e no espaço, que é um pressuposto básico da análise e modelagem ambiental.

O NDVI apresenta variações de [-1] até [+1], em que as superfícies desprovidas de cobertura vegetal, como solos expostos ou preparados para a agricultura, zonas urbanas, entre outras apresentam valores aproximados a [-1], e áreas com densa cobertura vegetal, como florestas de grande porte apresentam valores aproximados a [+1]. Os valores de NDVI entre [-1] e [+1] representam áreas de transição entre não-florestais e florestais.

Com a aplicação do NDVI na Bacia do Arroio Grande busquei visualizar inicialmente as mudanças de uso e cobertura da terra que ocorreram entre os anos de 1987 e 2002 (**Figura 4.7** e **Figura 4.8**, respectivamente). Pude perceber algumas mudanças importantes, principalmente em relação ao índice de fitomassa³, que de 1987 reduziu-se drasticamente para o ano de 2002. A redução do índice de fitomassa implica na redução da quantidade de vegetação e na redução da densidade vegetal.

Explico tais alterações pelas condições ambientais de cada período analisado. Como o índice de vegetação é um reflexo destas condições, a alteração em determinados elementos climáticos, como a temperatura e a precipitação, acaba produzindo efeitos colaterais na vegetação. Os climogramas de períodos anteriores às imagens do satélite LANDSAT analisadas forneceram subsídios para as análises das alterações do NDVI. A **Figura 4.9** apresenta os índices de precipitação e temperatura para os anos de 1987 e 2002 na Bacia do Arroio Grande⁴.

Para o ano de 1987, percebo um maior volume de precipitação nos meses que antecedem a tomada das imagens pelo satélite LANDSAT 5 TM, em que haviam uma maior tendência de precipitação nos meses de inverno, e que reduziu-se tendenciosamente até os meses de verão. Para o ano de 2002, nos meses de inverno há uma menor tendência de precipitação, que aumenta conforme se aproxima o verão. Nesse sentido, compreendo que a resposta da vegetação natural não apresenta uma resposta muito rápida em relação à variação de precipitação. Por isso, as chuvas de inverno, mais intensas, possibilitaram um maior processo de florescimento vegetal para o ano de 1987 do que para o ano de 2002.

No espaço, o NDVI apresentou poucas variações, apresentando-se maior em áreas florestais, como no Rebordo do Planalto Meridional, e menor em áreas com pouca ou sem vegetação, como em áreas de campos ou áreas agrícolas. Percebo nitidamente os contornos do Rebordo do Planalto, pois esta é uma área de elevadas declividades, e que apresenta maiores restrições quanto a ocupação agrícola e econômica. Tal índice apresenta as mesmas variações para os anos de 1987 e 2002, porém, para 2002, há uma redução substancial de vegetação fotossinteticamente ativa.

4.2.4. Segmentação e Classificação de Imagens

O processo de classificação de imagens multiespectrais de Sensoriamento Remoto visa extrair informações temáticas. Nesse sentido, os dados espectrais coletados pelos satélites são transformados em informações de uso e cobertura da terra.

Uma forma de representar uma imagem multiespectral é através do espaço de atributos, que é caracterizado como um espaço vetorial multiespectral, em que cada *pixel* da imagem é plotado como um ponto cujas coordenadas são dadas pelos valores de intensidade em cada uma das bandas espectrais analisadas.

Assumindo que cada banda multiespectral fornece uma boa discriminação entre os diversos alvos, é possível agrupar os *pixels* pertencentes a um mesmo alvo em um espaço de atributos. Essas nuvens são chamadas de classes que, segundo *Fonseca (2001)*, o classificador deve reconhecer.

Nesse sentido *Jensen (1986)* expõem a idéia de que o classificador divide o espaço de atributos em regiões distintas, encontrando as fronteiras de decisão entre as classes. A **Figura 4.10** apresenta o processo de classificação de imagens multiespectrais.

Jensen (1986) ainda informa que os classificadores podem ser divididos em classificadores *pixel a pixel*, que utilizam apenas a informação espectral isolada de cada *pixel* para identificar as classes temáticas, e os classificadores por regiões, em que a imagem é particionada em áreas homogêneas (segmentação) e cada região é associada a uma classe temática. Justifico a escolha da classificação por segmentação, por esta possibilitar melhores resultados finais, pois este método simula o comportamento de fotointerpretação, reconhecendo áreas homogêneas nas imagens, superando a classificação por *pixels* isolados. Esta abordagem por *pixels* isolados apresenta a limitação da análise pontual ser baseada unicamente em atributos espectrais. Para superar estas limitações, proponho o uso de segmentação de imagem, anterior à fase de classificação, onde são extraídos os objetos relevantes.

O processo de segmentação⁵ baseia-se em cálculos de critérios de similaridade, como média, matriz de covariância e textura (área). A agregação é feita, segundo *Fonseca (2001)*, segundo algum critério de similaridade e um limiar (definidos pelo usuário), que definem as regiões segmentadas. *Fonseca (2001)* também apresenta as características de agrupamento de regiões no Aplicativo SPRING. Então, duas regiões adjacentes A e B são agrupadas, se e somente se: 1) a média das regiões A e B forem similares; 2) a medida de similaridade satisfazer o limiar estabelecido; e 3) A e B forem mutuamente próximas.

O resultado final do processo de segmentação é uma imagem rotulada, em que cada região apresenta um rótulo (valor digital), que posteriormente será classificado.

No processo de segmentação utilizei [10] para valor de similaridade e [20] para área de agrupamento de *pixels*. Esses valores dependem basicamente da experiência do usuário e da qualidade de classificação exigida, bem como do tipo de imagem analisada. Considerei esses valores satisfatórios, pois houve um bom agrupamento de *pixels* homogêneos.

Com o processamento digital das imagens do Sensor TM e ETM dos Satélites LANDSAT 5 e LANDSAT 7, respectivamente, pude quantificar e analisar a ocupação da Bacia do Arroio Grande. Os resultados obtidos permitem estimar as mudanças de uso e cobertura da terra. A **Tabela 3.2** apresenta a quantificação dos dados de uso e cobertura da terra para os anos de 1987 e 2002. A **Figura 4.11** apresenta as classes de uso e cobertura da terra para o ano de 1987 e a **Figura 4.12** apresenta as classes de uso e cobertura da terra para o ano de 2002.

Uso da Terra	1987 (Ha)	2002 (Ha)	Evolução
Florestas	14.100,64	15.715,05	+ 4,57%
Campos	12.925,11	12.105,05	- 2,30%
Agricultura	2.032,46	3.697,48	+ 4,60%
Agricultura Irrigada	2.003,60	1.749,34	- 0,80%
Solos Expostos	4.102,19	1.919,21	- 6,15%
Lâmina d'água	195,52	173,39	- 0,35%
TOTAL	35.359,52	35.359,52	---

Tabela 4.3 – Dados de uso e cobertura da terra na Bacia do Arroio Grande para os anos de 1987 e 2002.

De uma maneira generalizada, ocorreram mudanças substanciais de uso e cobertura da terra na Bacia do Arroio Grande. Mesmo que o período de análise constitua-se de 15 anos, as maiores modificações ocorreram nas áreas florestais e nas áreas agrícolas, que aumentaram 5,05% e 4,60%, respectivamente. Porém, considero que as classes Agricultura, Agricultura Irrigada e Solos Expostos encontram-se qualificadas tecnicamente como áreas agrícolas. Solos expostos, geralmente estão em pousio ou em fase de preparo para cultivos agrícolas. Considerando por esse ponto de vista, houve um decréscimo de 772 hectares, o que representa 2,20% do total da área cultivada. Em 1987 essas áreas correspondiam a 8.138,25 hectares, e em 2002, correspondiam a 7.366,33 hectares. Observando os mapas de uso e cobertura da terra para os anos de 1987 e 2002, percebo as maiores alterações que ocorreram não referem-se a área, mas sim, à localização espacial. As áreas agrícolas do Rebordo do Planalto foram abandonadas, porém transferidas para áreas mais planas, principalmente no Planalto Meridional.

No vale do Arroio Grande (baixo curso), constituído por uma planície aluvial, predominam os cultivos de arroz irrigado. As matas ciliares foram basicamente suprimidas em função da ocupação agrícola. Os solos expostos que se apresentam nessa planície constituem-se em áreas de pousio e que serão apenas ocupadas na safra seguinte.

O Rebordo do Planalto é originalmente coberto por florestas estacionais, denominadas de Mata Atlântica. Os resquícios de clareiras existentes na Bacia do Arroio Grande (campos de vegetação rasteira) são indícios do paleoclima, pois as florestas estacionais avançaram sobre essa região. Apresentam-se distribuídas conforme o tipo de relevo e a altitude, conforme estudos de *Brena e Longhi (2002)*.

Nas formações aluviais do vale do Arroio Grande as florestas apresentavam menor densidade e extratos mais baixos. As formações do Rebordo, que se caracteriza como uma área bastante dissecada e acidentada, encontram-se mais preservadas, bem como mais densas e em maiores extratos. As formações florestais localizadas em altitudes superiores caracterizam-se principalmente pela interação com as matas de araucárias do paleoclima. Nessa perspectiva, os campos do Planalto Meridional foram utilizados para a criação bovina e cultivos agrícolas, por

apresentar boas pastagens e terras férteis, enquanto que as encostas deste planalto foram ocupadas por lavouras agrícolas de subsistência, nas quais eram cultivados feijão, fumo, milho e soja.

O uso e a cobertura da terra para o ano de 1987 apresenta-se bem definido, pois os usos da terra apresentam-se conforme a compartimentação geomorfológica⁶. Ou seja, há alguns condicionantes do relevo para a estruturação da ocupação da Bacia do Arroio Grande. A **Tabela 4.4** apresenta informações de uso e cobertura da terra na Bacia do Arroio Grande para o ano de 1987.

Micro-bacias	Florestas (Hectares)	Campos (Hectares)	Agricultura (Hectares)	Agricultura Irrigada (Hectares)	Solos Expostos (Hectares)	Lâmina Água (Hectares)
01	262,83	437,87	43,53	415,05	72,85	44,67
02	2.306,42	1.718,92	42,88	350,47	762,77	63,35
03	2.372,13	1.559,84	234,51	315,80	642,40	---
04	696,08	992,13	284,75	82,80	418,75	---
05	1.385,68	1.052,08	222,31	---	253,26	4,22
06	762,20	968,25	405,90	---	236,95	3,24
07	653,24	1.430,00	265,60	---	293,62	1,20
08	658,81	804,89	132,80	5,70	208,50	3,81
09	800,64	376,20	57,26	1,15	71,07	5,03
10	2.322,69	1.961,24	152,86	203,22	749,87	40,28
11	766,68	823,85	19,90	629,41	122,24	29,72
12	1.111,62	799,84	170,16	---	269,91	---
TOTAL	14.100,64	12.925,11	2.032,46	2.003,60	4.102,19	195,52

Tabela 4.4 – Uso e Cobertura de Terra na Bacia do Arroio Grande para o ano de 1987.

As microbacias que apresentam maiores índices percentuais de cobertura vegetal localizam-se principalmente no Rebordo do Planalto Meridional, nas quais a cobertura florestal varia entre 42,77 e 61,05% do total de sua área. As microbacia das planícies aluviais do Arroio Grande apresentam os menores percentuais de cobertura vegetal, que varia desde 20,58 até 32,05%. As microbacias do Planalto Meridional apresentam cobertura florestal, que varia desde 28,13 até 47,49% do total da área da microbacia. Esses índices variam conforme a ocupação agrícola de cada microbacia, ou seja, em microbacias com maiores percentuais de ocupação agrícolas, a cobertura florestal é proporcionalmente menor.

Justifico essa afirmativa ao analisar a **Tabela 4.4**, na qual observo que o aumento da atividade agrícola (agricultura, agricultura irrigada e solos expostos) está diretamente relacionado com a diminuição da cobertura florestal. Microbacias da planície aluvial do Arroio Grande apresentam elevados percentuais de atividade agrícola, tendo em média uma ocupação de aproximadamente 41,60% do total da área ocupada com cultivos agrícolas (arroz irrigado).

No Rebordo do Planalto, as microbacias apresentam áreas agrícolas que variam entre 9,87 e 22,04% do total da área, e no Planalto Meridional, as áreas agrícolas variam entre 19,20 a 37,80% do total da área de cada microbacia. Destaco ainda a ocorrência de campos nas microbacias do Planalto Meridional, pois estas são ocupadas entre 40,10 e 55,00% por áreas de campos. A configuração espacial manteve-se com poucas alterações até o ano de 2002, embora algumas modificações importantes ocorreram, dentre as quais destaco uma maior intensidade de ocupação agrícola dos campos de cima do Planalto Meridional, e do aumento florestal, principalmente nas áreas do Rebordo, pois estas foram abandonadas pelos agricultores, principalmente pelo fato de não possuírem aptidão agrícola. Os dados de uso e cobertura da terra na Bacia Hidrográfica do Arroio Grande para o ano de 2002 são apresentadas na **Tabela 4.5**.

Micro-bacias	Florestas (Hectares)	Campos (Hectares)	Agricultura (Hectares)	Agricultura Irrigada (Hectares)	Solos Expostos (Hectares)	Lâmina Água (Hectares)
01	271,37	417,00	18,25	433,37	90,93	46,18
02	2.485,00	1.763,50	387,00	305,06	288,50	15,75
03	2.530,57	1.836,25	248,56	180,81	323,81	4,68
04	834,32	1.040,81	349,25	2,81	247,31	---
05	1.427,32	987,12	394,68	2,18	102,75	3,50
06	826,68	1.013,43	432,75	1,68	97,00	5,00
07	754,37	657,06	1.129,00	---	98,81	5,75
08	798,68	651,46	209,25	4,75	141,56	8,81
09	922,00	341,43	30,62	---	13,87	3,43
10	2.766,75	1.916,12	132,75	192,68	372,93	48,93
11	888,06	774,75	3,50	626,00	73,81	25,68
12	1.209,93	706,12	361,87	---	67,93	5,68
TOTAL	15.715,05	12.105,05	3.697,48	1.749,34	1.919,21	173,39

Tabela 4.5 – Uso e Cobertura de Terra na Bacia do Arroio Grande para o ano de 2002.

Dentre as principais mudanças de uso e cobertura da terra, destaco o aumento geral da cobertura florestal, de 5,05%, e o aumento da cobertura florestal nas microbacias do Rebordo do Planalto, que passaram a apresentar maiores índices percentuais, variando entre 47,40 e 70,30% do total da área de cada microbacia. A atividade agrícola também apresentou algumas alterações – que não se refletiram na variação da área agrícola – que se referem principalmente às alterações espaciais. As lavouras agrícolas mantiveram-se nas planícies aluviais, reduziram-se nas áreas do Rebordo do Planalto (que conseqüentemente apresentou um aumento da cobertura florestal) e aumentaram no topo do Planalto Meridional. A atividade agrícola no Planalto Meridional varia entre 19,60 até 46,40% do total da área de cada microbacia. Também houve uma redução nas áreas de campo e pastagens, pois estas apresentaram uma redução geral na área, de aproximadamente 2,30%.

Existem diversas metodologias de modelagem de sistemas ambientais. Um dos objetivos da Modelagem Ambiental de ecossistemas é a formulação de políticas públicas de gestão ambiental, dentro do conceito de sustentabilidade. Destacam-se, entre a modelagem ambiental, algumas vertentes de estudos que incluem: I) a ocupação territorial; II) as mudanças de uso e cobertura da terra; e, III) a relação homem-ambiente⁷.

Na configuração espacial, busco compreender a dinâmica de ocupação territorial dos diferentes atores e suas formas de produção, numa perspectiva de embasar os processos de modelagem ambiental. As formas de ocupação e produção são condicionados por fatores físicos e antrópicos, que dão formas e seqüências distintas para o uso da terra.

Então, a caracterização do processo de ocupação nas diferentes áreas de estudo, segundo *Escada e Alves*⁸ (2001), envolve o conhecimento dos principais agentes (atores) e fatores (motores) físicos e socioeconômicos envolvidos na transformação da cobertura e uso da terra, o que requer uma análise espaço-temporal, que permita reconstituir trajetórias de conversão do uso da terra e identificar os principais fatores que explicam essas trajetórias.

As variações espaciais das áreas florestais e agrícolas podem ser mais bem compreendidas ao observar a **Tabela 4.6**, em que apresento as

variações percentuais para florestas e áreas agrícolas, entre os anos de 1987 e 2002.

Micro-bacia	Florestas (%)			Agricultura (%)		
	2002	1987	Evolução	2002	1987	Evolução
01	21,25	20,58	0,67	42,48	41,61	0,87
02	47,38	43,98	3,40	18,70	22,04	- 3,35
03	49,38	46,29	3,09	14,70	23,27	- 8,58
04	33,72	28,13	5,59	24,22	31,78	- 7,55
05	48,92	47,49	1,43	17,12	16,30	0,82
06	34,79	32,07	2,71	22,36	27,05	- 4,69
07	28,52	24,70	3,82	46,42	21,14	25,28
08	44,02	36,31	7,71	19,60	18,78	0,82
09	70,31	61,05	9,25	3,39	9,87	- 6,48
10	50,95	42,77	8,18	12,86	20,37	- 7,51
11	37,13	32,05	5,07	29,41	32,26	- 2,85
12	51,45	47,27	4,18	18,28	18,71	- 0,44
TOTAL	44,44	39,88	4,57	20,83	23,02	-2,18

Tabela 4.6 – Mudanças de Uso e Cobertura de Terra na Bacia do Arroio Grande entre os anos de 1987 e 2002.

Um aspecto bastante interessante que percebo é o aumento da cobertura florestal em todas as microbacias. As microbacias com maiores percentuais de atividade agrícola foram as tiveram as menores evoluções florestais. Já as microbacias localizadas no Rebordo do Planalto apresentam as maiores evoluções florestais, tanto que verifiquei aumentos de 3,09 ate 9,25% por microbacia hidrográfica. A **Tabela 4.7** e a **Figura 4.13** apresenta a evolução florestal da Bacia do Arroio Grande entre os anos de 1987 e 2002.

Evolução Florestal	Área (Hectares)
Desflorestamentos	1.729,34
Reflorestamentos	3.343,75
Manutenção Florestal	12.371,30

Tabela 4.7 – Evolução florestal da Bacia Hidrográfica do Arroio Grande entre os anos de 1987 e 2002.

Entre os anos de 1987 e 2002, ocorreram desmatamentos de 1.729,34 hectares, em que estas áreas foram ocupadas com atividades agrícolas. Um detalhe que percebo é a ocorrência de desflorestamentos nas bordas externas das florestas. As áreas que apresentaram desmatamentos correspondem a áreas mais planas e com melhores aptidões agrícolas. Contrastando com essa situação, houve um aumento florestal de 3.343,75 hectares. Em geral, essas áreas nas vertentes mais íngremes dos afluentes do Arroio Grande, constituindo-se em espaços agrícolas abandonados pelos agricultores.

Outro aspecto é a redução da atividade agrícola, que ocorreu quase que substancialmente nas microbacias do Rebordo do Planalto. As variações foram de aproximadamente 0,44 a 8,55% do total da área de cada microbacia. Também merece destaque o aumento da área agrícola no topo do Planalto Meridional [Microbacia 07], em que houve um aumento de 25,28% na área cultivada com soja. Essa modificação é reflexo da tendência de ocupação dos campos do Planalto Meridional, principalmente com lavouras de soja. A **Figura 4.14** apresenta a evolução agrícola da Bacia do Arroio Grande entre os anos de 1987 e 2002 e a **Tabela 4.8** apresenta as principais modificações ocorridas.

Evolução Agrícola	Área (Hectares)
Manutenção Agrícola	4.683,96
Avanço Agrícola sobre Florestas	402,12
Avanço Agrícola sobre Campos	3.052,17
Evolução para Florestas Secundárias	1.040,50
Evolução para Campos	3.119,94

Tabela 4.8 – Evolução agrícola da Bacia do Arroio Grande entre os anos de 1987 e 2002.

O avanço agrícola sobre áreas florestais e campos ocorreu principalmente em áreas do topo do planalto e nas planícies aluviais do Arroio Grande, ocupando 402,12 e 3.052,17 hectares, respectivamente. As lavouras agrícolas abandonadas transformaram-se em áreas de campos, principalmente, e em florestas secundárias, correspondendo a 3.119,94 e 1.040,50 hectares, respectivamente.

¹ O modelo de campos enxerga o espaço geográfico como uma superfície contínua, sobre a qual variam os fenômenos a ser observados, segundo diferentes distribuições. Um exemplo a ser citado pode ser um mapa de uso da terra.

² O modelo de objetos representa o espaço geográfico como uma coleção de entidades distintas e identificáveis, como um cadastro espacial de lotes urbanos.

³ O NDVI assume grande importância, já que as imagens do Satélite LANDSAT foram adquiridas nos mesmos períodos do ano, em 15 de março de 1987 e 15 de março de 2002.

⁴ Os dados analisados foram obtidos junto a Estação Meteorológica da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM).

⁵ O processo de segmentação é constituído, basicamente de três formas, que dependem do tipo de dados usados na análise e da área de aplicação. O particionamento pode ocorrer por crescimento de regiões (1), por detecção de bordas (2) e pela combinação do crescimento de regiões e detecção de bordas (3).

⁶ Para uma melhor avaliação, a Bacia do Arroio Grande foi dividida em áreas menores, conforme a rede hidrográfica, sendo chamadas de microbacias. Considerei então, as microbacias de número [1] e [11] como sendo localizadas nas planícies aluviais do Arroio Grande. A microbacia hidrográfica de número [9] encontra-se localizada no Rebordo do Planalto Meridional, enquanto que as microbacias [2], [3], [10] e [12] possuem aproximadamente apenas 50% do total de sua área localizada sobre este compartimento geomorfológico, sendo que as nascentes destas microbacias (restante da área de cada microbacia – 50%) encontram-se no topo do Planalto Meridional. Já as microbacias de número [4], [5], [6], [7] e [8] localizam-se efetivamente em altitudes superiores a 400 metros, o que caracteriza a localização no Planalto Meridional.

⁷ Segundo *Monteiro e Câmara*, no Programa de Estudos de Modelagem Ambiental do Ministério da Ciência e tecnologia e do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (2004). Disponível em: <http://www.dpi.inpe.br/geopro/modelagem/>.

⁸ Relatório Técnico de Mudanças de Uso e Cobertura do Solo na Amazônia: Impactos Sócio-Ambientais na Ocupação de Regiões de Fronteira Agrícola. São José dos Campos: INPE e MCT.

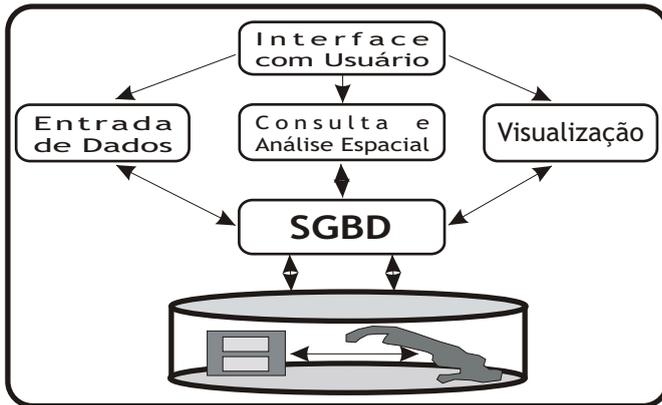


Figura 4.1

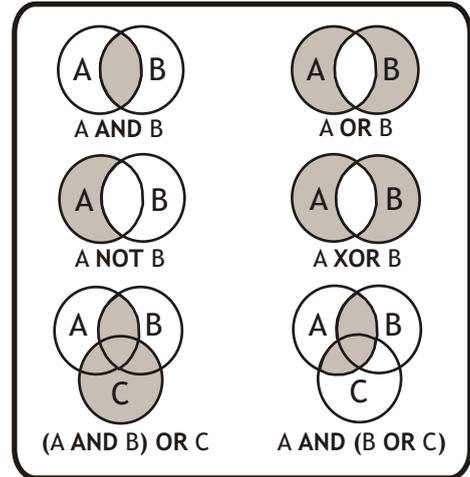


Figura 4.2

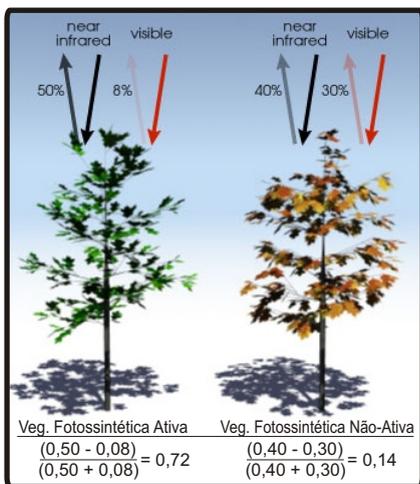


Figura 4.6

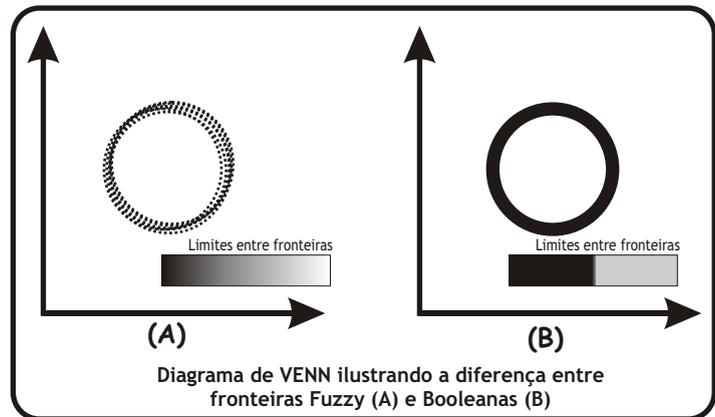


Figura 4.3

Figura 4.1 - Componentes de um Sistema de Informações Geográficas.
Fonte: Câmara et al (1997).

Figura 4.2 - Diagrama de VENN com as possibilidades de operações *booleanas*.
Fonte: Burrough e McDonnell (1998).

Figura 4.3 - Diagrama de VENN ilustrando as diferenças entre fronteiras *booleanas* e fronteiras *fuzzy*.
Fonte: Burrough e McDonnell (1998).

Figura 4.6 - Comparação do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada.
Fonte: Earth Observathory (2004).

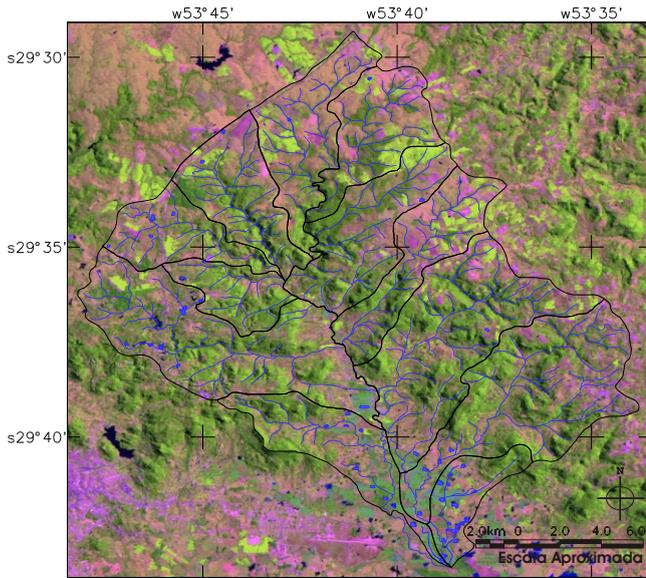


Figura 4.4

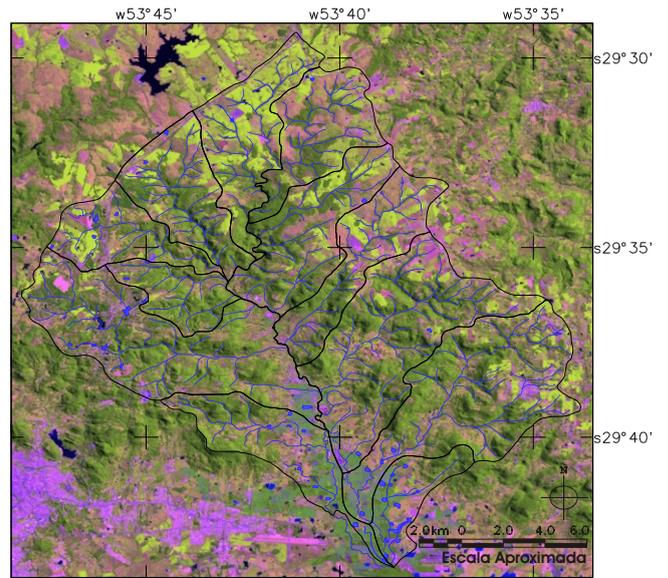


Figura 4.5

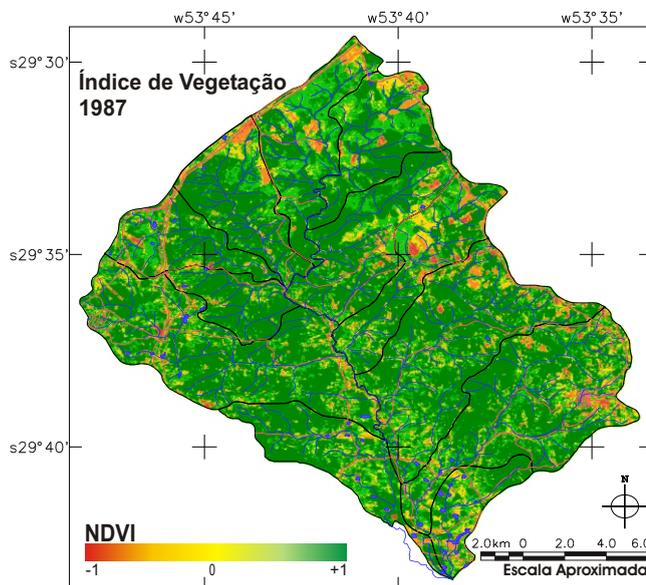


Figura 4.7

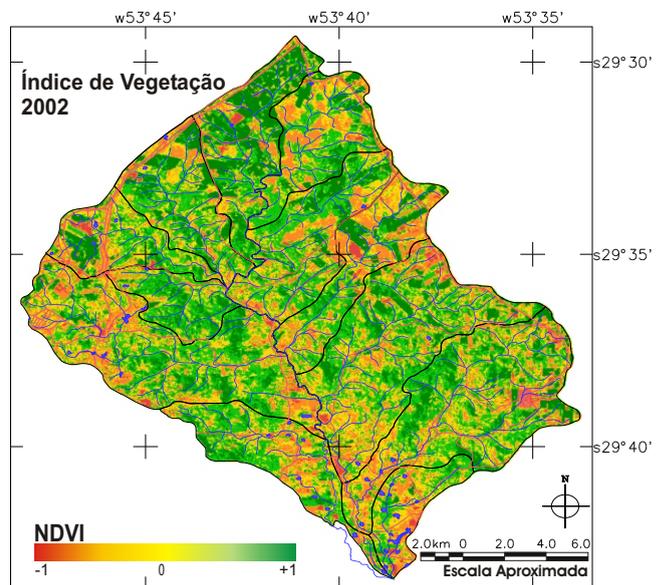


Figura 4.8

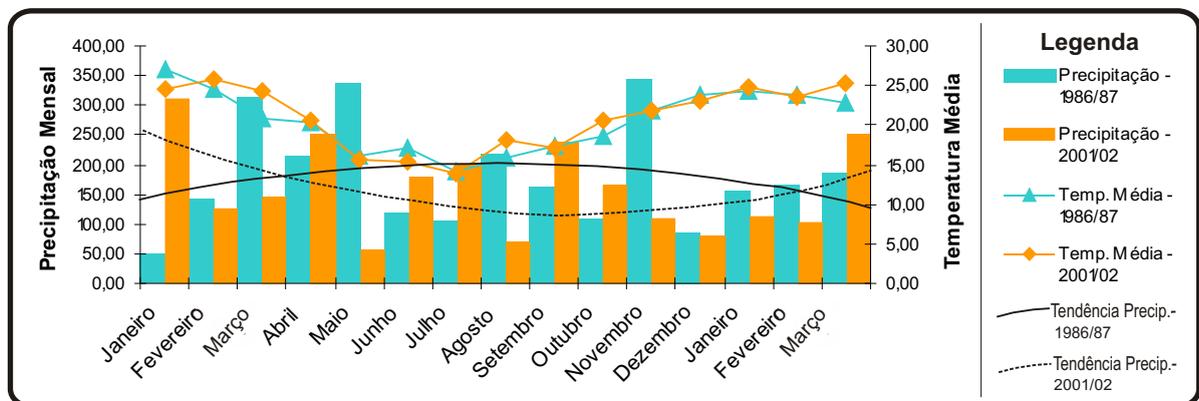


Figura 4.9

Figura 4.4 - Composição falsa-cor de imagens LANDSAT 5 *TM* com correção atmosférica para o ano de 1987.
 Figura 4.5 - Composição falsa-cor de imagens LANDSAT 7 *ETM* com correção atmosférica para o ano de 2002.
 Figura 4.7 - Índice de Vegetação por Diferença Normalizada da Bacia do Arroio Grande para o ano de 1987.
 Figura 4.8 - Índice de Vegetação por Diferença Normalizada da Bacia do Arroio Grande para o ano de 2002.
 Figura 4.9 - Índices de precipitação e temperatura da Bacia do Arroio Grande para os anos de 1987 e 2002.

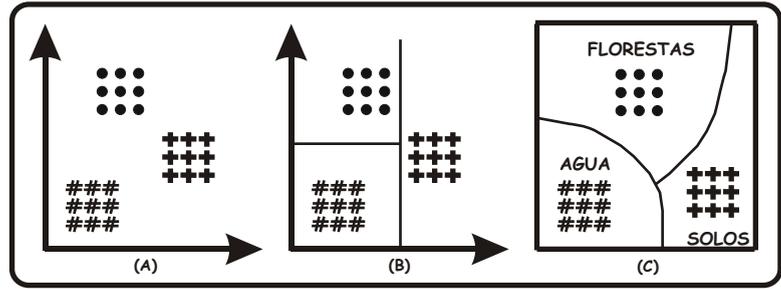


Figura 4.10

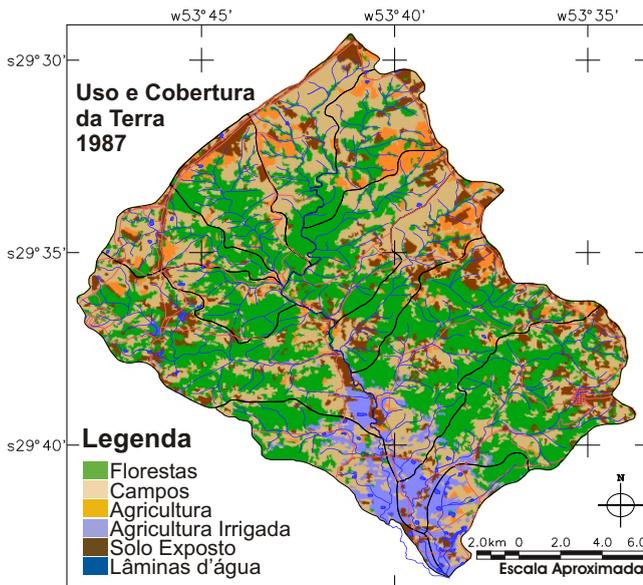


Figura 4.11

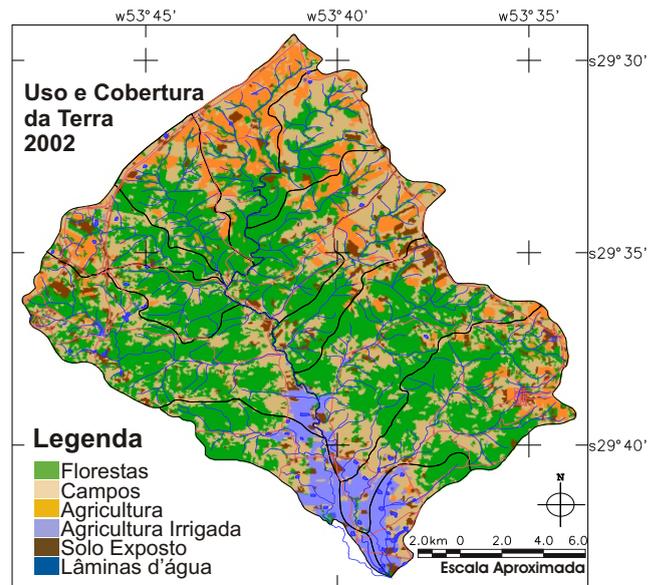


Figura 4.12

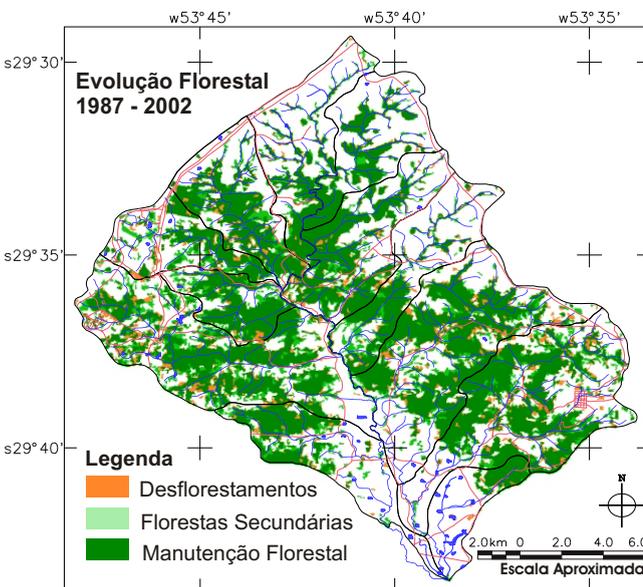


Figura 4.13

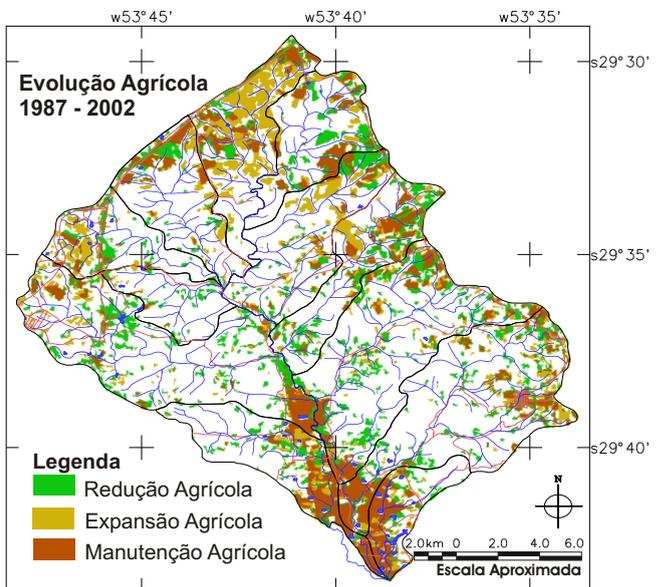


Figura 4.14

Figura 4.10 - Representação de uma imagem multiespectral no espaço de atributos (A), no processo de classificação (B) e no mapa temático (C).

Fonte: Fonseca (2001).

Figura 4.11 - Mapeamento de uso e cobertura da terra na Bacia do Arroio Grande para o ano de 1987.

Figura 4.12 - Mapeamento de uso e cobertura da terra na Bacia do Arroio Grande para o ano de 2002.

Figura 4.13 - Evolução florestal da Bacia Hidrográfica do Arroio Grande entre os anos de 1987 e 2002.

Figura 4.14 - Evolução agrícola da Bacia Hidrográfica do Arroio Grande entre os anos de 1987 e 2002.

5. OS RECURSOS HÍDRICOS NO CONTEXTO DA GESTÃO AMBIENTAL

5.1. A INTERFACE DA GESTÃO DAS ÁGUAS E A QUESTÃO AMBIENTAL

A água é um elemento fundamental para a subsistência dos homens na Terra. Muito abundante no globo, a água ocupa $\frac{3}{4}$ da superfície terrestre. Entretanto, de toda água existente na Terra, 97,2% é salgada e apenas 2,8% é doce¹. Do total de água doce disponível, 78,1% aparecem na forma de gelo, 21,5% ocorrem em aquíferos e apenas 0,4% é água superficial (**Figura 5.1**). A água superficial, dado o fácil acesso para exploração, tem recebido grande preferência de utilização para diferentes fins. Entretanto, o uso descontrolado aliado à sua grande vulnerabilidade tem causado a deterioração deste recurso natural, que é a base de todo o desenvolvimento humano.

É sob tal ótica, considerando-se as situações de alteração do quadro natural dos recursos² hídricos e as repercussões sobre o uso e ocupação das terras que discorro os parágrafos a seguir.

O processo de ocupação do espaço, em uma determinada época e sociedade, faz com que o meio ambiente tenha um caráter dinâmico. Dessa forma, *Guerra e Cunha (1996)* salientam que o ambiente é alterado pelas atividades humanas e o grau de alteração do espaço, em relação a outro, é avaliado pelos seus diferentes modos de produção.

É reconhecido que o crescimento e desenvolvimento socioeconômico alteram os sistemas naturais, embora não se deva por em risco os sistemas naturais mais importantes como água, terra e ar³. Com o grande crescimento econômico e populacional após a Segunda Guerra Mundial (1944), houve também um grande crescimento industrial e urbano. Com tal crescimento, ocorreu uma superutilização dos recursos naturais renováveis e não-renováveis, aumentando desse modo os impactos ambientais – que passaram a ter conseqüências globais.

O aumento dos problemas ambientais esta causando uma tragédia ecológica, sendo que uma crise ambiental foi deflagrada no final do Século XX pela degradação das condições de vida da população e dos ambientes naturais. Com a Conferência de Estocolmo (1972) buscou-se a conciliação entre desenvolvimento econômico e preservação ambiental. A partir de outras conferências mundiais sobre o meio ambiente, surgiu a concepção de *Desenvolvimento Sustentável*. A necessidade de se encontrar um ponto de equilíbrio entre acumulação de capital e apropriação dos recursos naturais de forma sustentável, ocorreu em face da preservação da biodiversidade aliada às melhorias nas condições de vida da população.

A degradação ambiental do final do Século XX causou, entre outros fatores, a poluição dos recursos hídricos superficiais e subterrâneos⁴. Com a idéia de Desenvolvimento Sustentável, tornou-se clara a necessidade de utilização racional dos recursos hídricos e da gestão das águas. O uso sustentável da água, descrito nas *Diretrizes Estratégicas para o Fundo de Recursos Hídricos* do *Ministério da Ciência e Tecnologia* (2001), é considerado uma das bases da sociedade moderna. Os principais desafios referentes à gestão dos recursos hídricos relacionam-se com a escassez de água e a deterioração destes recursos.

As políticas de desenvolvimento sustentável, citando-se como exemplo, o Relatório Brundtland – *Nosso Futuro Comum* (1987) e a Agenda 21 (1992), passaram a estimular programas e procedimentos que estimulam a preservação dos recursos naturais, reconhecendo também o crescimento e desenvolvimento econômico, constituindo-se, conforme *Christofolletti* (1998) no atual desafio das sociedades.

A importância da questão dos recursos hídricos é resumida em um dos parágrafos do Capítulo 18 (*Proteção da Qualidade e do Abastecimento dos Recursos Hídricos: Aplicação de Critérios Integrados no Desenvolvimento, Manejo e Uso*) da Agenda 21⁵ (1992), definida na Rio 92:

A escassez generalizada, a destruição gradual e o agravamento da poluição dos recursos hídricos em muitas regiões do mundo, ao lado da implantação progressiva de atividades incompatíveis, exigem o planejamento e manejo integrados desses recursos. Essa integração deve cobrir todos os tipos de massas inter-relacionadas de água doce, incluindo tanto águas de superfície como subterrâneas, e levar devidamente em consideração os aspectos quantitativos e qualitativos. Deve-se reconhecer o caráter multissetorial do desenvolvimento dos recursos hídricos no contexto do desenvolvimento socioeconômico, bem como os interesses múltiplos na utilização desses recursos para o abastecimento de água potável e saneamento, agricultura, indústria, desenvolvimento urbano, geração de energia hidroelétrica, pesqueiros de águas interiores, transporte, recreação, manejo de terras baixas e planícies e outras atividades. Os planos racionais de utilização da água para o desenvolvimento de fontes de suprimento de água subterrâneas ou de superfície e de outras fontes potenciais têm de contar com o apoio de medidas concomitantes de conservação e minimização do desperdício. No entanto, deve-se dar prioridade às medidas de prevenção e controle de enchentes, bem como ao controle de sedimentação, onde necessário.

Os desafios no gerenciamento dos recursos hídricos estão diretamente relacionados com a gestão ambiental, pois os recursos hídricos são recursos naturais. A correta utilização do solo, implantada através do zoneamento ambiental em bacias hidrográficas respalda a gestão dos recursos hídricos.

Para *Browner (1996)*, qualquer projeto de planejamento de bacias hidrográficas deverá incluir:

1. Levantamento e caracterização dos recursos naturais e das comunidades que deles dependem;
2. Formulação de objetivos e metas a atingir baseados na vulnerabilidade dos recursos naturais e na necessidade de se atingir o equilíbrio dos ecossistemas e da população;
3. Identificação dos problemas e desenvolvimento dos planos de ação;
4. Implementação e monitoramento dos planos estabelecidos.

O conhecimento do potencial dos recursos hídricos de uma região é um importante subsídio à gestão dos recursos hídricos superficiais e/ou subterrâneos e para o planejamento da ocupação sustentada de seu território, prevenindo alterações predatórias nas características dos mananciais hídricos e suas conseqüências sobre usos e ocupações da terra.

5.2. POLÍTICAS INSTITUCIONAIS DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS HÍDRICOS NO BRASIL

A *Política Nacional do Meio Ambiente*, instituída pela Lei 6.938, de 31 de agosto de 1981, tem como objetivo a preservação, a melhoria e a recuperação da qualidade ambiental propícia a vida, visando também desenvolver condições para a dignidade da vida humana. Entre os princípios adotados, o *Ministério do Meio Ambiente (1998)* cita: 1) a consideração do meio ambiente como patrimônio público a ser protegido; 2) o planejamento e a fiscalização do uso dos recursos naturais; 3) o controle e o zoneamento das atividades potencialmente e efetivamente poluidoras; 4) incentivos aos estudos e pesquisas orientadas para o uso sustentável e a proteção dos recursos naturais; 5) a recuperação de áreas degradadas e o posterior acompanhamento da qualidade ambiental; e, 6) a educação ambiental em todos os níveis de ensino.

Nesse sentido, foram criados em 1990, o Sistema Nacional do Meio Ambiente (SISNAMA) e o Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). Mais especificamente, para implementar o gerenciamento de recursos hídricos, foi criado, em 1997, a Política Nacional dos Recursos Hídricos.

O CONAMA é o órgão consultivo e deliberativo do SISNAMA, sendo presidido pelo Ministério do Meio Ambiente (MMA) e pelo Instituto Brasileiro de Meio Ambiente e Recursos Naturais Renováveis (IBAMA). O CONAMA apresenta como objetivos⁶ a compatibilização do desenvolvimento econômico e social, com a preservação da qualidade do meio ambiente e do equilíbrio ecológico, definindo áreas prioritárias de ação governamental

relativa à qualidade e equilíbrio ecológico. Também são citados a difusão de tecnologias orientadas para o uso sustentável dos recursos ambientais e o manejo do meio ambiente⁷.

A Lei nº 9.433, de 1997, que institui a Política Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos constitui-se num marco de significativa importância para a implementação do termo *desenvolvimento sustentável* no Brasil. Com base na necessidade de adequação do sistema brasileiro de gestão de recursos hídricos a Política Nacional de Recursos Hídricos, que em seu Artigo 2º prevê:

I – assegurar à atual e as futuras gerações a necessária disponibilidade de água, em padrões de qualidade adequada aos respectivos usos.

II – a utilização racional e integrada dos recursos hídricos com vistas ao desenvolvimento sustentável.

III – a prevenção e defesa contra eventos hidrológicos críticos de origem natural ou decorrente do uso inadequado dos recursos naturais.

Na elaboração da Lei nº 9.433 foram considerados diversos princípios para a gestão dos recursos hídricos: I) Adoção da bacia hidrográfica como unidade de planejamento; II) A consideração dos usos múltiplos da água; III) O reconhecimento da água como bem finito e vulnerável; IV) O reconhecimento do valor econômico do recurso, entre outros.

Esta lei também estabelece, em seu Artigo 3º, as diretrizes de implementação e gerenciamento de Recursos Hídricos, constando aí a integração da gestão dos recursos hídricos com a gestão ambiental, a articulação da gestão dos recursos hídricos com a adequação do uso do solo e a articulação do planejamento de recursos hídricos com o planejamento regional.

Estes termos não são suficientemente abordados na regulamentação da Lei nº 9.433/1997, porém são fundamentais na implementação da política de recursos hídricos. Enquanto instrumento de planejamento estratégico, a Política Nacional de Recursos Hídricos aborda basicamente definições sobre *o que, quando e quem deve fazer*, não priorizando

aspectos práticos de *como fazer*. Como conseqüências, muitas são as possibilidades de planejamento estratégico, cabendo aos comitês gestores de bacias hidrográficas definir as políticas locais de recursos hídricos.

Para promover a gestão de recursos hídricos, a Política Nacional de Recursos Hídricos prevê a criação de Comitês de Bacias Hidrográficas⁸, com a função de debater as questões relacionadas aos recursos hídricos da bacia e articular a proteção e sustentabilidade destes. Os principais instrumentos do Comitê de Bacias Hidrográficas, segundo o MMA, são o Plano de Recursos Hídricos, o Enquadramento dos Cursos d' Água, a Outorga dos Direitos e a Cobrança de Uso, e o Sistema de Informações sobre Recursos Hídricos.

Estes instrumentos foram estabelecidos em lei para avaliar a qualidade da água e ampliar o conhecimento sobre a disponibilidade e natureza dos recursos, engajando-se no processo de recuperação, adensamento e monitoramento da situação ambiental. Os instrumentos sugerem a utilização de indicadores de controle de atividades humanas que causam pressão sobre o meio ambiente, indicadores do estado do meio ambiente e recursos naturais e indicadores da qualidade das políticas, programas e ações para proteção ambiental ou uso sustentável dos recursos⁹.

O desafio do Ministério do Meio Ambiente e do Ministério da Ciência e Tecnologia, através do Fundo Setorial de Recursos Hídricos, é o de criar tecnologias que permitam viabilizar o planejamento ambiental de recursos hídricos, compatibilizando uso e preservação no conjunto de bacia hidrográfica.

Para tanto, o Ministério do Meio Ambiente e o Ministério da Ciência e Tecnologia definiram áreas prioritárias de intervenção. Uma das áreas contempladas por este estudo constitui-se em uso e conservação do solo e de sistemas hídricos. A **Tabela 5.1** apresenta as principais características dessa área prioritária.

Categorias de Intervenção	Áreas Prioritárias	Principais Problemas Observados	Objetivos da Intervenção
Pesquisa e Desenvolvimento	Uso e Conservação do Solo e de Sistemas Hídricos	Erosão e Sedimentação do Solo, Perda de Cobertura Natural e Reflorestamentos Inadequados	Desenvolver Práticas de Ocupação e Aproveitamento do Espaço, com a Conservação do Solo e dos sistemas Hídricos

Tabela 5.1 – Áreas Prioritárias para Financiamento de Ações pelo CT Hidro.
Fonte: *Ministério da Ciência e Tecnologia (2001)*.

A seguir são destacados os principais desafios identificados pelo Programa *CT Hidro*, dando-se ênfase para o *Uso e Conservação do Solo e de Sistemas Hídricos*.

Os desafios dessa linha de pesquisa referem-se ao desenvolvimento agrosilvopastoril, a partir da ocupação dos espaços naturais, pois os principais impactos verificados são: a) erosão do solo e produção de sedimentos que se depositam nos rios, agregados a pesticidas; b) degradação da superfície do solo com impacto local e a jusante da bacia; c) drenagem e conflito pela água em áreas de banhados, que representam ecossistemas a serem preservados; d) o desmatamento de áreas com conseqüências importantes sobre o ciclo hidrológico; e) redução da proteção de áreas marginais de rios e cursos d'água¹⁰.

5.3. ESTUDOS DE MODELAGEM HIDROLÓGICA

As bacias hidrográficas são objetos de diversos estudos ambientais, e justificadas por muitos autores como *Browner (1996)*, *EPA (1996)*, *Botelho (1999)*, *Guerra e Cunha (1999)*, *Cooke e Doornkamp (1990)* e *Morgan (1986)*, *Kersten et al (1997)* e *Ward e Elliot (1995)*. Conforme esses autores, as bacias podem ser definidas como sistemas que captam e despejam águas sobre canais de escoamento e que desembocam numa única saída.

Para melhor entender os modelos hidrológicos, é necessário analisar os componentes envolvidos no ciclo hidrológico. Soares e Rennó (2003) descrevem de uma maneira bem simplificada o ciclo hidrológico. A água é o agente essencial nesse processo. A principal entrada de água no sistema é a precipitação. Considerando que exista uma cobertura vegetal sobre o solo, a água da chuva é interceptada pelo dossel. Esta água interceptada pode então ser evaporada. Da água que chega até a superfície do solo, parte é infiltrada (entra no perfil de solo) e parte pode escoar superficialmente. A água infiltrada irá se redistribuir ao longo do perfil de solo. Simultaneamente à entrada de água no solo, a água pode estar sendo evaporada pela superfície ou retirada do solo pelas raízes e transpirada pelas folhas do dossel. A água pode ainda descer o perfil de solo e chegar ao lençol freático.

Em terrenos íngremes, pode ocorrer ainda, um fluxo lateral sub-superficial. No terreno, formam-se então canais por onde a água flui preferencialmente. Esses canais escoam água durante um evento de precipitação, ou durante algum tempo depois, cessando tão logo a água infiltre no solo. Outros canais, por sua vez permanecem constantemente escoando água, como os cursos efluentes, a menos que, por algum motivo, o nível do lençol freático venha a baixar, fazendo com que o canal fique acima da zona de saturação. A **Figura 5.2** ilustra esquematicamente os principais processos e componentes do ciclo hidrológico.

A variação da disponibilidade de água dentro de uma bacia hidrográfica pode ser contabilizada através de um balanço que obedece a lei de conservação de massa. De um modo bastante simplificado, conforme Soares e Renno (2003), o balanço de água pode ser resumido conforme a [Equação 5.1].

$$Q_i - Q_o = \Delta V / \Delta t \quad \text{[Equação 5.1]}$$

em que Q_i corresponde a vazão de entrada, Q_o corresponde a vazão de saída, ΔV corresponde ao volume da água armazenado na bacia e Δt corresponde ao tempo de análise. O volume de água armazenado na bacia é equivalente ao volume da água retido em superfície, correspondendo ao volume infiltrado, volume escoado e volume retido em reservatórios superficiais.

Esta equação do balanço hídrico, conforme *Soares e Rennó (2003)* pode ser utilizada para eventos simples de simulações de precipitações, ou para séries temporais, embora as escala de cada um dos processos possam ser consideravelmente diferentes.

Para fins de planejamento e modelagem hidrológica em sistemas ambientais, considerei valores médios de infiltração, evapotranspiração e escoamento superficial. *Bloom (1970)* informa que, do volume de água precipitado sobre a terra, 62,63% corresponde a evaporação/evapotranspiração. O restante (37,37%) da água fica retido na superfície. Do total retido na superfície, 20,55% infiltram no solo, 9,35% escoam para reservatórios superficiais de água e 7,47% vão para o escoamento superficial.

O volume de água que deveria infiltrar nas bacias hidrográficas corresponde a 20,55%. Extrapolando os valores acima para bacias hidrográficas, e considerando como 100% o volume de água que deveria infiltrar, tenho: 89,3% infiltram em florestas, 7,20% infiltram em campos e 3,60% infiltram em áreas agrícolas. A **Figura 5.3** apresenta, de uma maneira esquemática, o destino da água no ciclo hidrológico.

Estabelecidos os valores médios do ciclo hidrológico, *Garcia (2001)*, com base em *Odum (1988)*, *Bunting (1971)* e *Grosvenor (1996)*, comenta que podem ser determinados os volumes de água perdidos em áreas de florestas, campos e agricultura, prevendo áreas a serem recuperadas ambientalmente.

Através da precipitação anual (2.614 mm para o ano de 2002) e da razão desta com a área de cada microbacia, pude calcular o volume de água que precipita sobre a bacia, bem como o volume de água evaporada e evapotranspirada, escoada, infiltrada e retida na superfície em rios, lagos e banhados, nos específicos usos da terra: florestas, campos e agricultura.

O comportamento do ciclo hidrológico, de uma maneira geral, depende da precipitação e da área de cada microbacia. Determinei todo o volume de água perdida de acordo com os percentuais de infiltração médio para cada uso da terra, sendo diretamente proporcional à área ocupada por florestas, campos e agricultura. A **Tabela 5.2** apresenta o balanço hídrico geral da Bacia do Arroio Grande.

Micro-bacia	Área (Hectares)	Volume Precipitado (m³/ano)	Volume Evaporado (m³/ano)	Volume Retido na Bacia (m³/ano)		
				Infiltração	Retenção	Escoamento
01	1.277,10	34.371.869	21.527.102	7.063.419	3.213.770	2.567.579
02	5.244,81	141.158.816	88.407.767	29.008.137	13.198.349	10.544.564
03	5.124,68	137.925.638	86.382.827	28.343.719	12.896.047	10.303.045
04	2.474,50	66.598.693	41.710.761	13.686.031	6.226.978	4.974.922
05	2.917,55	78.522.941	49.178.918	16.136.464	7.341.895	5.865.664
06	2.376,54	63.962.198	40.059.524	13.144.232	5.980.465	4.777.976
07	2.644,99	71.187.261	44.584.581	14.628.982	6.656.009	5.317.688
08	1.814,51	48.835.722	30.585.813	10.035.741	4.566.140	3.648.028
09	1.311,35	35.293.674	22.104.428	7.252.850	3.299.959	2.636.437
10	5.430,16	146.147.326	91.532.070	30.033.276	13.664.775	10.917.205
11	2.391,80	64.372.905	40.316.751	13.228.632	6.018.867	4.808.656
12	2.351,53	63.289.078	39.637.950	13.005.906	5.917.529	4.727.694
TOTAL	35.359,52	951.666.121	596.028.492	195.567.388	88.980.782	71.089.459

Tabela 5.2 – Balanço Hídrico da Bacia do Arroio Grande.

Dentre os principais resultados, destaco que precipitam sobre a Bacia do Arroio Grande, aproximadamente 951.666.121 m³ de água por ano. Destes, apenas 195.567.388 m³ infiltram e são armazenados no sub-solo da bacia. Outros 88.980.782 m³ são retidos em superfícies como rios, barragens, lagos e banhados. Aproximadamente 71.089.459 m³ são escoados superficial e sub-superficialmente. O ciclo hidrológico vai apresentar modificações conforme o tipo de uso e cobertura da terra em cada microbacia, conforme **Figura 5.4**, pois a área de florestas, campos/pastagens e áreas agrícolas vão determinar o volume de água infiltrada, retida e escoada superficialmente.

A partir da cobertura florestal de cada microbacia do Arroio Grande, pude estipular o volume de água infiltrada e perdida. O volume de água perdida corresponde a todo volume de água que deixou de infiltrar. *Garcia (2001)* considera essa perda de água normal, pois ocorre em áreas florestais. Esse volume de água corresponde a 10,70%, ou seja, o restante dos 89,30% do volume total de água infiltrada em florestas. A **Tabela 5.3** apresenta o balanço hídrico em áreas florestais por microbacia do Arroio Grande.

Micro-bacia	Área Florestal (Hectares)	Volume Precipitado (m ³ /ano)	Volume a Infiltrar (m ³ /ano)	Volume Infiltrado (m ³ /ano)	Volume Perdido (m ³ /ano)
01	271,37	7.303.652	1.500.901	1.340.154	160.746
02	2.485,00	66.881.290	13.744.105	12.272.111	1.471.994
03	2.530,57	68.107.761	13.996.145	12.497.158	1.498.987
04	834,32	22.454.888	4.614.480	4.120.269	494.211
05	1.427,32	38.414.890	7.894.260	7.048.785	845.475
06	826,68	22.249.266	4.572.224	4.082.539	489.685
07	754,37	20.303.114	4.172.290	3.725.438	446.852
08	798,68	21.495.674	4.417.361	3.944.262	473.099
09	922,00	24.814.708	5.099.422	4.553.274	546.148
10	2.766,75	74.464.310	15.302.416	13.663.527	1.638.889
11	888,06	23.901.247	4.911.706	4.385.662	526.044
12	1.209,93	32.564.056	6.691.914	5.975.210	716.704
TOTAL	15.715,05	422.954.856	86.917.223	77.608.388	9.308.835

Tabela 5.3 – Balanço Hídrico em Áreas Florestais da Bacia do Arroio Grande.

Microbacias com maiores percentuais de cobertura florestal apresentam um volume maior de água infiltrada, bem como um menor volume de água perdida. Para microbacias com menores percentuais de cobertura florestal, ocorre o processo inverso. Ou seja, estas microbacias apresentam menores volumes de água infiltrada, enquanto que o volume de água perdida é muito maior. A Bacia do Arroio Grande perde 9.308.835 m³ de água por ano em áreas florestais.

Em áreas de campos e pastagens, a Bacia do Arroio Grande perde aproximadamente 62.163.945 m³ de água, dentre os quais, 6.657.758 m³ de água são consideradas perdas normais, o restante, um volume de 55.506.187 m³ de água é perdida em excesso por ano. A **Tabela 5.4** apresenta o balanço hídrico de cada microbacia do Arroio Grande.

Do volume total precipitado, apenas 7,20% infiltram em áreas de campos e pastagens. Toda a água restante é perdida em escoamento superficial e sub-superficial. É um volume de água muito grande, pois representa aproximadamente 92,8% do total precipitado. Considerando que a perda de água é diretamente proporcional a área de ocorrência, as microbacias que possuírem maiores extensões de campos e pastagens, apresentarão também grandes volumes de água perdida. Essas microbacias localizam-se principalmente nas áreas mais elevadas da Bacia do Arroio Grande, área que corresponde ao Planalto Meridional, em que a

cobertura de campos e pastagens varia de 35,30 a 42,70% do total da área de cada microbacia. Esse percentual semantém nas microbacias da planície aluvial do Arroio Grande, e diminui nas áreas do Rebordo do Planalto, em que a cobertura florestal é mais intensa, variando desde 24,80 a 33,60% do total da área de cada microbacia.

Micro-bacia	Área Campos (Hectares)	Volume Precipitado (m ³ /ano)	Volume a Infiltrar (m ³ /ano)	Volume Infiltrado (m ³ /ano)	Volume Perdido (m ³ /ano)	Perdas em Excesso (m ³ /ano)
01	417,00	11.223.138	2.306.355	164.904	2.141.450	1.912.101
02	1.763,50	47.462.839	9.753.613	697.383	9.056.230	8.086.308
03	1.836,25	49.420.833	10.155.981	726.153	9.429.828	8.419.894
04	1.040,81	28.012.360	5.756.540	411.593	5.344.947	4.772.504
05	987,12	26.567.348	5.459.590	390.361	5.069.229	4.526.315
06	1.013,43	27.275.455	5.605.106	400.765	5.204.341	4.646.956
07	657,06	17.684.113	3.634.085	259.837	3.374.248	3.012.866
08	651,46	17.533.394	3.603.113	257.623	3.345.490	2.987.188
09	341,43	9.189.247	1.888.390	135.020	1.753.370	1.565.584
10	1.916,12	51.570.454	10.597.728	757.738	9.839.991	8.786.128
11	774,75	20.851.622	4.285.008	306.378	3.978.630	3.552.519
12	706,12	19.004.514	3.905.428	279.238	3.626.189	3.237.825
TOTAL	12.105,05	325.795.316	66.950.937	4.786.992	62.163.945	55.506.187

Tabela 5.4 – Balanço Hídrico em Áreas de Campos/Pastagens da Bacia do Arroio Grande.

Para avaliar o balanço hídrico em áreas agrícolas, inicialmente tive que considerar como “áreas efetivamente agrícolas” as classes temáticas: 1) Agricultura, 2) Agricultura Irrigada, e 3) Solos Expostos. Somei a área dessas três classes temáticas para obter dados de infiltração e perdas de água em cada microbacia do Arroio Grande. A Tabela 5.5 apresenta os dados do ciclo hidrológico por microbacia hidrográfica do Arroio Grande.

Áreas agrícolas apresentam apenas 3,60% de infiltração no solo, e o restante é escoado superficialmente e perdido. Nesse sentido, a Bacia do Arroio Grande perde aproximadamente 39.289.885 m³ de água, dos quais 35.081.938 m³ de água são perdidos em excesso, ou seja, deixam de infiltrar e abastecer o lençol freático.

As maiores perdas de água ocorrem nas microbacias com maior ocupação agrícola. Essas microbacias estão localizadas no topo do Planalto Meridional e na planície aluvial do Arroio Grande, apresentando

aproximadamente ocupações agrícolas entre 22,40 e 46,50% do total da área de cada microbacia. As microbacias do Rebordo do Planalto apresentam menores percentuais de ocupação agrícola, que variam de 3,40 até 19,60% do total da área de cada microbacia, e como consequência apresentam menores perdas de água.

Conforme variam as taxas de ocupação agrícola, varia também o balanço hídrico, pois as microbacias com maiores taxas percentuais de agricultura apresentam também os maiores volumes de perdas de água.

Micro-bacia	Área Agrícola (Ha)	Volume Precipitado (m³/ano)	Volume a Infiltrar (m³/ano)	Volume Infiltrado (m³/ano)	Volume Perdido (m³/ano)	Perdas Excesso (m³/ano)
01	542,55	14.602.191	3.000.750	106.827	2.893.923	2.583.984
02	980,56	26.390.792	5.423.308	193.070	5.230.238	4.670.079
03	753,18	20.271.087	4.165.708	148.299	4.017.409	3.587.145
04	599,37	16.131.444	3.315.012	118.014	3.196.997	2.854.599
05	499,61	13.446.504	2.763.256	98.372	2.664.885	2.379.475
06	531,43	14.302.907	2.939.247	104.637	2.834.610	2.531.023
07	1.227,81	33.045.278	6.790.805	241.753	6.549.052	5.847.649
08	355,56	9.569.542	1.966.541	70.009	1.896.532	1.693.413
09	44,49	1.197.404	246.066	8.760	237.307	211.891
10	698,36	18.795.661	3.862.508	137.505	3.725.003	3.326.055
11	703,31	18.928.885	3.889.886	138.480	3.751.406	3.349.630
12	429,80	11.567.637	2.377.149	84.627	2.292.523	2.046.994
TOTAL	7.366,03	198.249.331	40.740.238	1.450.352	39.289.885	35.081.938

Tabela 5.5 – Balanço Hídrico em Áreas Agrícolas da Bacia do Arroio Grande.

Se considerar a compartimentação geomorfológica de cada microbacia¹¹, posso estipular o volume de água precipitada, infiltrada e perdida conforme a compartimentação do relevo. Através da **Tabela 5.6** posso determinar o volume de água perdida em excesso conforme o compartimento geomorfológico de cada microbacia. Para determinar esse volume total de água perdida por compartimento, somei o volume da perda de água em excesso conforme a localização espacial de cada microbacia hidrográfica.

Nas planícies aluviais, são perdidos aproximadamente 11.389.000 m³ de água anualmente em uma área de 3.668,90 hectares. Essas perdas ocorrem principalmente nas áreas agrícolas de arroz irrigado. Nas áreas de

maiores declividades que caracterizam o Rebordo do Planalto Meridional, o volume de água perdida em excesso corresponde a aproximadamente 22.857.000 m³ de água por ano, em uma área equivalente a 10.386 hectares. Nas áreas de nascentes da Bacia do Arroio Grande, que se localizam no topo do Planalto Meridional, o volume de água perdida em excesso corresponde a aproximadamente 51.650.000 m³, captada em 21.303,64 hectares. É um volume muito grande de água perdida nas nascentes da Bacia do Arroio Grande, representando aproximadamente 57% do volume total de água perdida em excesso nesta bacia.

Através da **Tabela 5.6**, ainda percebo que algumas microbacias apresentam perda bastante elevada de água. A média por microbacia hidrográfica corresponde a 46,32%, porém algumas microbacias apresentam perdas acima deste valor médio, variando até 63,65% em microbacias com pouca cobertura florestal e elevada atividade agrícola. Outras microbacias apresentam pequenas perdas de água. As taxas mínimas de perdas situam-se a partir de 24,51% do volume total de água a infiltrar.

Microbacia	A Infiltrar (m ³ /ano)	Perd. Excesso (m ³ /ano)		Área a Florestar	
		m ³ /ano	%	Hectares	%
01	7.063.419	4.496.085	63,65	172,07	13,57
02	29.008.137	12.756.387	43,98	488,19	9,41
03	28.343.719	12.007.038	42,36	459,51	9,07
04	13.686.031	7.627.103	55,73	291,89	11,90
05	16.136.464	6.905.790	42,80	264,29	9,16
06	13.144.232	7.177.979	54,61	274,70	11,66
07	14.628.982	8.860.515	60,57	339,09	12,92
08	10.035.741	4.680.601	46,64	179,13	9,97
09	7.252.850	1.777.475	24,51	68,02	5,29
10	30.033.276	12.112.183	40,33	463,54	8,64
11	13.228.632	6.902.149	52,18	264,15	11,14
12	13.005.906	5.284.818	40,63	202,25	8,70
TOTAL	195.567.388	90.588.125	46,32	3.466,82	9,90

Tabela 5.6 – Balanço Hídrico em Áreas Agrícolas da Bacia do Arroio Grande.

Nesse sentido, destaco a erosividade da chuva e a densidade de cobertura vegetal. Em áreas menos protegidas, como em campos, pastagens e áreas agrícolas, a energia cinética da chuva aumenta, tornando principalmente a erosão superficial laminar mais intensa, com a conseqüente remoção e transportes de sedimentos dos solos.

Guerra (1998) comenta que em áreas com mais de 70% de cobertura vegetal, o processo de infiltração de água na terra torna-se mais lento, porém mais intenso ao longo do tempo. Se o processo de infiltração aumenta, reduz conseqüentemente o volume de água escoado superficialmente e o volume de solos erodidos. O autor ainda comenta que a cobertura florestal controla a erosão dos solos de três maneiras: 1) atuando sobre o *runoff*, 2) no balanço hidrológico, e 3) nas variações sazonais da interceptação.

Para manter o equilíbrio hidrológico da Bacia Hidrográfica do Arroio Grande, estipulei as áreas de florestas a serem implantadas para evitar que a água seja perdida em excesso¹². Cerca de 9,90% do total da área do Arroio Grande deve ser florestada, o que corresponde a 3.466,82 hectares. A **Tabela 5.6** apresenta as áreas de florestas que deveriam existir para reter a perda de água em excesso por microbacia hidrográfica.

Estabeleci as áreas a serem florestadas a partir dos índices médios de infiltração em florestas estabelecidos por *Bunting (1971)* e *Grosvenor (1996)*. Os autores informam que em áreas de: 1) florestas infiltram 150 mm por hora, 2) campos e pastagens infiltram 12 mm por hora, e 3) agrícolas infiltram 6 mm por hora. Para compensar a perda de água em excesso, a implantação de florestas torna-se uma alternativa¹³ bastante viável.

¹ Dados do *World Resources Institute* (2003), que podem ser acessados no site <http://earthtrends.wri.org>.

² *Raffestin* (1993) coloca que os recursos são instrumentos do poder, pois estes desempenham um papel ligado diretamente ao contexto socioeconômico e político quanto a sua significação como instrumento do poder. Nessa perspectiva *Raffestin* ainda salienta que um recurso só é tido como “recurso” quando este apresenta uma utilidade indiscutível em função da estrutura tecno-científica, senão, continua sendo apenas mais uma matéria em disposição da sociedade.

³ Conforme *Guerra e Cunha* (1996).

⁴ Conforme *Albuquerque Filho et al* (1998).

⁵ Uma versão digital da Agenda 21 encontra-se disponível no site do Ministério do Meio Ambiente, no endereço www.mma.gov.br/agen21.

⁶ Conforme o *Ministério do Meio Ambiente* (1998).

⁷ Conforme o *Ministério do Meio Ambiente* (1998).

⁸ Conforme o *Ministério do Meio Ambiente* (1998).

⁹ Conforme o *Ministério do Meio Ambiente* (1998).

¹⁰ Conforme as *Diretrizes Estratégicas para o Fundo de Recursos Hídricos de Desenvolvimento Científico e Tecnológico do Ministério da Ciência e Tecnologia* (2001).

¹¹ Para fins de avaliação, considerei as microbacias de número [1] e [11] localizadas nas planícies aluviais do Arroio Grande. A microbacia hidrográfica de número [9] encontra-se localizada no Rebordo do Planalto Meridional, enquanto que as microbacias [2], [3], [10] e [12] possuem aproximadamente apenas 50% do total de sua área localizada sobre este compartimento geomorfológico, sendo que as nascentes destas microbacias (restante da área de cada microbacia – 50%) encontram-se no topo do Planalto Meridional. Já as microbacias de número [4], [5], [6], [7] e [8] localizam-se efetivamente em altitudes superiores a 400 metros, o que caracteriza a localização no Planalto Meridional.

¹² Ross (1994, 1995) salienta que, nem sempre o reflorestamento é a melhor solução para a recuperação de áreas degradadas, principalmente se a vegetação natural não corresponder a florestas. O autor ainda comenta que em ambientes degradados, a própria vegetação (em um processo de sucessão) tende a encontrar uma situação de equilíbrio dinâmico. Por isso, nem sempre é interessante recuperar áreas degradadas com a implantação de espécies florestais, principalmente se estas forem exóticas, como pinus e eucalipto, pois estas tendem a alterar a biodiversidade local e o equilíbrio local.

¹³ Maiores informações sobre a compensação de perda de água por florestas podem ser obtidas em *Garcia* (2001).

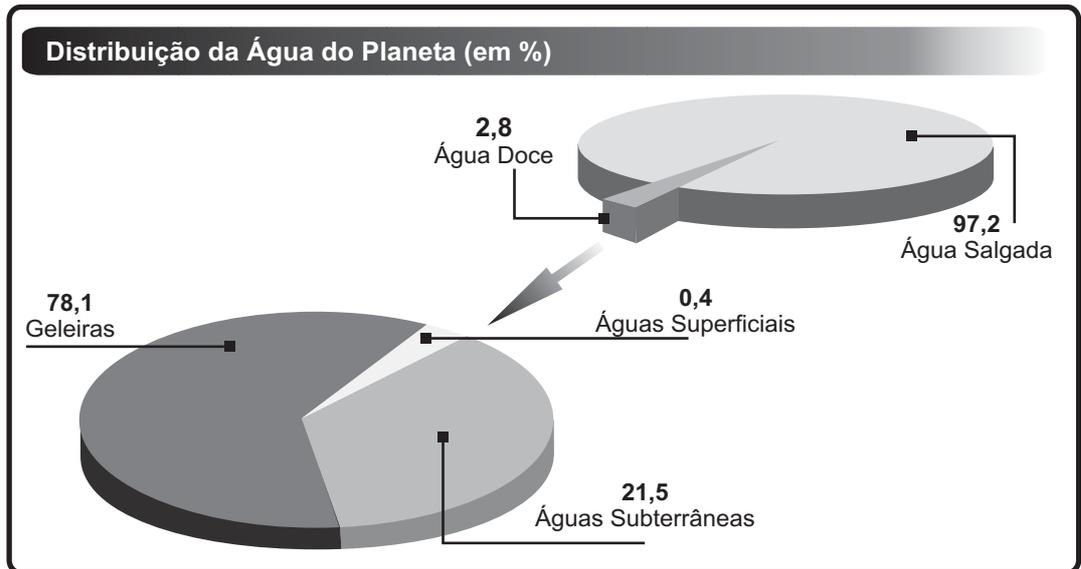


Figura 5.1

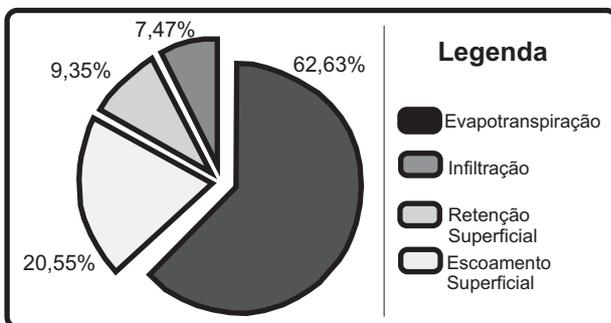


Figura 5.4

Figura 5.1 - Distribuição da água no Planeta.

Fonte: *World Resources Institute (2003)*.

Figura 5.2 - Principais componentes do ciclo hidrológico em superfície de bacias hidrográficas.

Fonte: *Soares e Rennó (2001)*.

Figura 5.3 - Destino das águas no ciclo hidrológico.

Fonte: *Garcia (2001)*.

Figura 5.4 - Destino da água precipitada e retida na superfície terrestre.

Fontes: *Odum (1988)*, *Bunting (1971)* e *Grosvenor (1996)*.

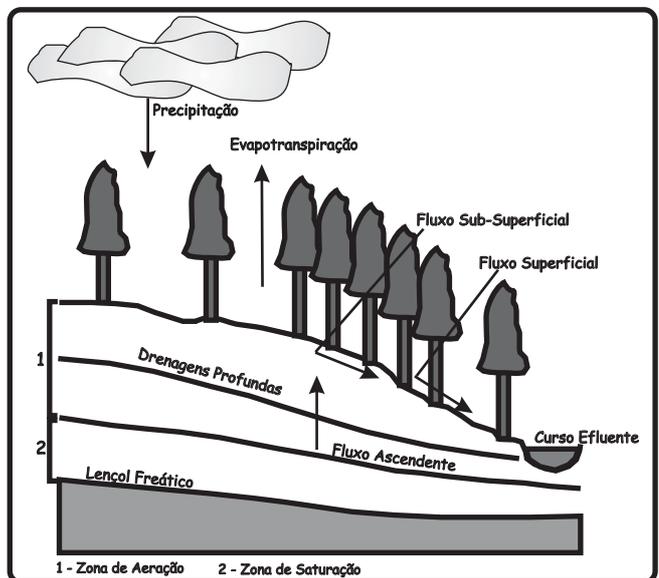


Figura 5.2

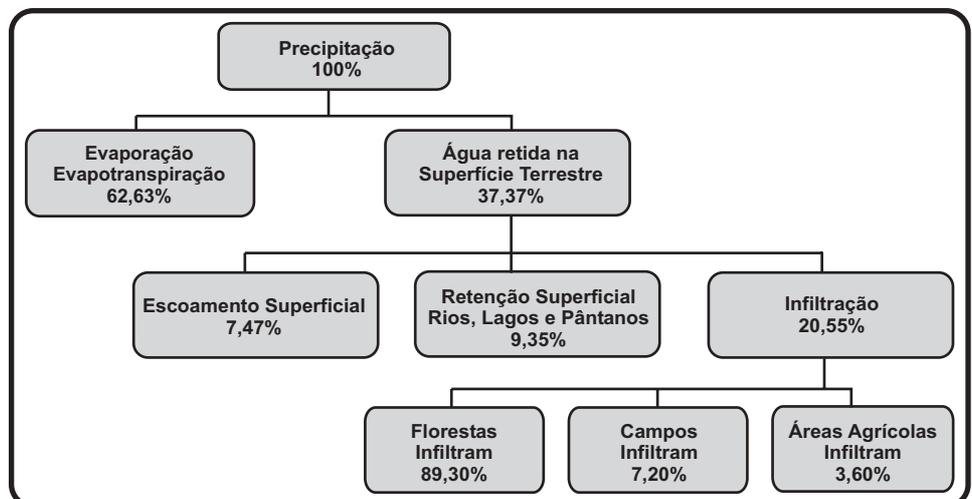


Figura 5.3

6. OS PROCESSOS EROSIVOS E A VULNERABILIDADE AMBIENTAL

Este capítulo aborda a erosão dos solos nas encostas, causada principalmente pela água oriunda do escoamento superficial e subsuperficial. Apesar de ser um problema mundial, a erosão dos solos ocorre de uma forma mais séria em locais com elevados índices de precipitação. A partir da compreensão da ocorrência dos processos erosivos, bem como suas causas e conseqüências, pode-se selecionar estratégias apropriadas de conservação.

O processo erosivo ocorre principalmente por forças naturais, como a água e o vento. Em uma abordagem conservacionista, o processo erosivo é acelerado pelas atividades humanas, principalmente pela agricultura e pecuária. A partir dessa perspectiva, a erosão e a deposição de sedimentos são processos complementares, pois as partículas do solo são removidas de áreas mais suscetíveis e depositadas em áreas mais planas e com menores declividades. As áreas de deposição de sedimentos também são severamente afetadas, pois estas possuem suas estruturas totalmente modificadas.

Algumas considerações também são tecidas acerca da perda de fertilidade dos solos através dos processos erosivos, pois os nutrientes são removidos, diminuindo assim sua produtividade. Nesse sentido, *Morgan (1986)* salienta que a erosão dos solos é a taxa de perda deste acima das condições de que ocorre em condições naturais. Tal conceito, sinônimo de erosão acelerada do solo, diferencia este processo dos naturais, que fazem

parte, principalmente, da geodinâmica de modelação do relevo. Porém, o processo erosivo atuante sobre o relevo local resulta da combinação de diversos fatores ambientais e antrópicos. Através da análise destes fatores isoladamente, pode-se compreender, de uma forma individualizada, os processos erosivos.

6.1. PROCESSOS EROSIVOS NA INTERFACE COM OS RECURSOS NATURAIS

O crescimento econômico apresentado atualmente pelo Estado do Rio Grande do Sul não foi acompanhado pela manutenção da qualidade do meio ambiente e pela preservação dos recursos florestais, hídricos e do solo. O desenvolvimento da agricultura e da pecuária, conforme *Marchiori, 1996*), deu-se em parte à custa da destruição das florestas nativas existentes, modificando drasticamente a paisagem do Estado.

A destruição das florestas subtropicais em conjunto com a intensificação da produção agrícola e a aplicação de práticas inadequadas de manejo do solo provocou graves desequilíbrios ambientais, com conseqüências na alteração dos processos erosivos e no regime hídrico¹.

Os conflitos de uso da terra ocorrem quando são exercidas atividades sobre o solo, sem que este tenha capacidade de suportar tais ações. Culturas agrícolas ou pastagens, ocupações urbanas, desmatamento são exemplos de conflitos de uso da terra quando realizados em áreas impróprias, como em elevadas declividades e topos de morros. Estes figuram entre os maiores responsáveis pelas erosões, assoreamento dos rios, enchentes e secas, contaminação de lençóis freáticos, poluição hídrica e lixiviações do solo².

Hidalgo (1987) salienta que esses conflitos se caracterizam pela alteração das propriedades físico-químicas ou biológicas dos recursos naturais renováveis causada por alguma forma de atividade humana, capaz

de criar condições nocivas à saúde do homem, à sociedade e ao meio ambiente.

O processo erosivo causa alterações na morfologia dos rios, alterando também o funcionamento da rede de drenagens. De acordo com *Schroeder (1993)*, com o assoreamento dos rios, diminui a capacidade de transporte e armazenamento de água, refletindo na diminuição do potencial hídrico e na quantidade de água disponível para irrigação.

Para *Costa e Matos (1997)*, o tipo de cobertura vegetal determina a vulnerabilidade ambiental dos solos, pois as florestas atuam como redutoras da fragilidade. Áreas com menor densidade de cobertura florestal e fitomassa participam proporcionalmente na proteção dos solos. *Burch et al (1987)* estudaram o comportamento de duas bacias hidrográficas, uma florestada e outra mantida apenas com gramíneas. As diferenças ocorreram principalmente nos picos de descarga durante os períodos chuvosos. Concluíram que, a condutividade hidráulica em florestas é o dobro maior que em áreas cobertas com gramíneas.

Nesse sentido, *Reichart (1989)* comenta que a condutividade hidráulica é dada pelo tipo de cobertura vegetal, influenciando assim no escoamento superficial. Esse fator dá às florestas o caráter regulador das bacias hidrográficas, atuando como filtros ou *esponjas* de absorção hídrica. As matas ciliares assumem então grande importância, pois além de serem reguladoras de fluxo da água, evitam a entrada de sedimentos nos cursos d'água.

6.2. A EQUAÇÃO UNIVERSAL DE PERDAS DE SOLOS

A *Equação Universal de Perdas de Solos* (USLE), atualmente é muito aplicada em bacias hidrográficas e também utilizada em projetos de planejamento ambiental e gestão de recursos naturais, como a água. A fórmula ganhou grandes facilidades de aplicações em Sistemas de Informações Geográficas, por estes apresentarem possibilidades de operações matemáticas de maneira automatizada. A equação de aplicação da USLE é descrita por *Ward e Elliot (1995)*, e *Righetto (1998)*, sendo dada pela [Equação 6.1]:

$$A = R * K * LS * CP \quad \text{[Equação 6.1]}$$

em que:

A	=	Perdas anuais de solos, em ton/hectare;
R	=	Índice de erosividade da chuva;
K	=	Fator de Erodibilidade dos solos;
LS	=	Fator de comprimento de encosta e declividade;;
CP	=	Fatores de uso, cobertura e conservação da terra.

Guerra (1998) define esses fatores como fatores controladores, pois esses determinam as variações nas taxas de erosão, e é por causa da interação desses fatores que certas áreas erodem mais que outras. A intervenção do homem pode alterar esses fatores e, conseqüentemente acelerar ou retardar os processos erosivos.

6.2.1. Fator R – Índice de Erosividade das Chuvas

O fator chuva é um índice numérico que expressa a capacidade da chuva de causar erosão em uma área sem proteção adequada. O Índice de erosividade da chuva (R), definido por *Bertoni e Lombardi Neto (op. cit.)*, pode ser estimado pela [Equação 6.2]:

$$R = 6,886 (r^2/P)^{0,85} \quad \text{[Equação 6.2]}$$

em que:

R	=	Índice de erosividade da chuva.
r	=	Precipitação média mensal (em mm).
P	=	Precipitação média anual (em mm).

A precipitação na Bacia do Arroio Grande, para o ano de 2002, corresponde a 2.691,4 mm (a média mensal é de 224,3 mm, aproximadamente). Aplicando a [Equação 6.2], determinei a erosividade da chuva³ na bacia. O resultado corresponde a 82,96. Importante é destacar que os parâmetros para a definição da erosividade da chuva, dependem basicamente do volume total de chuva, porém também interferem a intensidade, as variações no tempo e espaço e a energia cinética dos eventos chuvosos.

6.2.2. Fator K – Fator de Erodibilidade dos Solos

O fator de erodibilidade dos solos considera principalmente as propriedades físico-químicas dos solos, tais como: I) Velocidade de infiltração; II) Permeabilidade e capacidade de armazenamento; III) Resistência às forças de dispersão, abrasão e transporte pelas águas da chuva e escoamento superficial. Medidas experimentais de perdas de solos são bastante custosas e requerem muitos anos de determinações. Para

tanto, *Wishmeier e Smith (1978)*⁴ elaboraram um Nomograma para determinar o valor de K [(ton/ha)*(MJ/ha)*(mm/h)]. O Nomograma encontra-se disponível em *Righetto (1998)* e *Ward e Elliot (1995)*. Nesse Nomograma, o Valor de K é determinado a partir dos percentuais de silte, areia e matéria orgânica, sendo considerado também a estrutura e a permeabilidade do solo.

Na inexistência desses dados, recorro a algumas adaptações feitas por *Bertoni e Lombardi Neto (1985)*, que definem o Valor de K para os principais tipos de solos encontrados no Estado de São Paulo. Utilizo-me desses valores para definir o fator de erodibilidade dos solos na Bacia do Arroio Grande. A **Tabela 6.1** apresenta o Valor de K para os tipos de solos encontrados na bacia.

Tipos de Solos	Fator de Erodibilidade [(ton/ha)*(MJ/ha)*(mm/h)]
MTf – RLe1	1,256
PVAa1	1,074
PVAa3	1,074
PVd2	0,964
SGe1	1,284
APt2	1,332

Tabela 6.1 – Fator de erodibilidade dos tipos de solos da Bacia do Arroio Grande. Fonte: Adaptado – *Bertoni e Lombardi Neto (1985)*.

O fator de erodibilidade dos solos refere-se ao controle dos processos erosivos. Pela análise do Nomograma, posso observar que solos arenosos apresentam maiores índices erosividade, enquanto que em solos com maiores percentuais de argila, a erodibilidade diminui.

6.2.3. Fator LS – Fator Topográfico

O Fator *LS* expressa as relações do relevo no processo de perdas de solos. O fator topográfico combina a declividade média do terreno com o comprimento de encostas (*Bertoni e Lombardi Netto, 1985*), segundo a [Equação 6.3]:

$$LS = 0,00984 * C^{0,63} * D^{1,18} \quad \text{[Equação 6.3]}$$

em que:

LS	=	Fator Topográfico;
C	=	Comprimento de encosta (em m);
D	=	Declividade média de encosta (em %).

As principais influências topográficas frente aos processos erosivos decorrem principalmente aos efeitos na velocidade da água e na distancia percorrida. *Guerra (1998)* observa em alguns estudos que os solos com maiores taxas de erodibilidade eram aqueles situados em encostas com declives de 30%. Da mesma forma, quanto maiores os comprimentos das vertentes, mais a água aumenta sua velocidade e conseqüentemente, sua energia cinética.

6.2.4. Fator CP – Uso e cobertura da terra e práticas de conservação

O fator de uso e cobertura da terra expressa a relação esperada entre perdas de solos em áreas com culturas agrícolas e vegetação, com áreas continuamente descobertas. Para solos sem vegetação e sem proteção tem-se referencial equivalente a [$C = 1$] e áreas com florestas densas, adota-se [$C = 0,01$]. Para variações de vegetação e campos, *Righetto (1998)* estabelece, com base em diversos estudos, uma tabela que contem os valores de *C* e *P* a serem aplicados na equação da USLE. Tais valores

são estipulados conforme o tipo de uso e cobertura da terra e as práticas conservacionistas aplicadas, apresentados conforme a **Tabela 6.2**.

Plantas	Cobertura	Cobertura com gramíneas					
		0%	20%	40%	60%	80%	95%
Arbustos	25%	0,36	0,17	0,09	0,038	0,012	0,003
	50%	0,26	0,16	0,11	0,075	0,039	0,003
	75%	0,17	0,10	0,06	0,031	0,011	0,003
Arvores	25%	0,42	0,19	0,10	0,041	0,013	0,003
	50%	0,39	0,18	0,09	0,040	0,013	0,003
	75%	0,36	0,17	0,09	0,039	0,012	0,003

Tabela 6.2 – Valores de uso e cobertura da terra – Fator C.

Fonte: *Righetto (1998)*.

A cobertura vegetal reduz a quantidade de energia cinética que chega ao solo durante uma chuva. Outro fator importante é a redução dos processos erosivos nas formas de escoamento superficial e transporte de sedimentos. O efeito da vegetação sobre a erosão dos solos pode dar-se de acordo com a percentagem da cobertura vegetal (e. g., o índice de vegetação por diferença normalizada – NDVI – pode oferecer alguns subsídios quanto aos percentuais de cobertura vegetal ou densidade de vegetação e fitomassa). *Guerra (1998)* salienta que, em áreas com menos de 70% de cobertura vegetal, o *runoff* aumenta substancialmente, fazendo com que a perda de solos e água também aumente proporcionalmente.

As práticas de conservação dos solos (Fator *P*) também atuam nos processos erosivos e nas perdas de solos. Os valores de *P* variam conforme o tipo de cultura agrícola e as práticas conservacionistas adotadas na área de estudo. *Righetto (1998)* e *Bertoni e Lombardi Netto (1985)* definem alguns valores constantemente aplicados. A **Tabela 6.3** apresenta o Valor de *P* conforme as técnicas de manejo contra os processos erosivos.

Tipo de Manejo	Inclinação do Terreno (%)			
	2 a 7	8 a 12	13 a 18	19 a 24
Plantios morro abaixo	1,00	1,00	1,00	1,00
Faixas niveladas	0,50	0,60	0,80	0,90
Cordões de vegetação permanente	0,25	0,30	0,40	0,45
Terraceamento	0,10	0,12	0,16	0,18

Tabela 6.3 – Valores de *P* para alguns tipos de manejo do solos.

Fonte: *Righetto (1998)*.

Na Bacia do Arroio Grande utilizei os valores de *C* e *P*, conforme as definições de *Bertoni e Lombardi Neto (1985)* e *Righetto (1998)*. Nesse sentido, apresento na **Tabela 6.4** os valores utilizados em áreas de florestas, campos e agricultura.

Classe de Uso da Terra	Valor de C	Valor de P
Florestas	0,010	0,1
Campos	0,260	0,4
Agricultura	0,290	0,7
Agricultura Irrigada	0,360	1,0
Solos Expostos	0,404	1,0
Lâmina d'água	--	--

Tabela 6.4 – Valores de *C* e *P* para a Bacia do Arroio Grande.

6.2.5. Avaliações da Perda de Solos na Bacia do Arroio Grande

A perda de fertilidade dos solos através dos processos erosivos, pois os nutrientes são removidos, diminuindo assim sua produtividade. Nesse sentido, *Morgan et al (1986)* salientam que a erosão dos solos é a taxa de perda deste acima das condições de que ocorre em condições naturais. Tal conceito, sinônimo de erosão acelerada do solo, diferencia este processo dos naturais, que fazem parte, principalmente, da geodinâmica de modelação do relevo.

Porém, o processo erosivo atuante sobre o relevo local resulta da combinação de diversos fatores ambientais e antrópicos, como aqueles que são utilizados na equação de perdas de solos. Através da análise destes fatores isoladamente, pode-se compreender, de uma forma individualizada, os processos erosivos. Com relação aos fatores topográficos de uma microbacia, há varias formas de se avaliar tal parâmetro, como a gênese, as formas e as taxas de denudação e declividades. Porém, à medida que os processos modelam as encostas, pode-se pensar que as formas dependem dos processos atuantes, mas, deve-se, também, levar em conta as relações de causa e efeito. Uma vez estabelecido o processo erosivo em uma

encosta, a declividade passa a ter peso significativo, porém não se estabelece como uma função direta deste.

A erosividade da chuva, outro fator avaliado pela equação da USLE, apresenta-se como um fator bastante importante, pois todas as estações climáticas são praticamente chuvosas, com médias que variam entre 1600 e 2600 mm (em anos de *el nino*) por ano. Com chuvas bastante intensas, a erosão laminar ou distribuída é acelerada, principalmente pela grande quantidade de energia cinética produzida pelas águas da chuva, aumentando assim, seu poder de erosividade.

Aplicando a Equação Universal de Perdas de Solos, pude determinar, em níveis médios anuais, o volume de solos perdidos por erosão hídrica distribuída e concentrada. É importante salientar que, na equação da USLE, não são considerados os processos de deposição e os processos associados a sulcos efêmeros e destacamento e transporte de solos resultantes de eventos erosivos isolados. Para obter resultados quantificados acerca da perda de solos na Bacia do Arroio Grande, multipliquei as matrizes numéricas, através de Programação em LEGAL, correspondente aos índices de erosividade das chuvas e erodibilidade dos solos, aos fatores topográficos e de uso e cobertura da terra. A **Tabela 6.5** e a **Figura 6.1** apresentam as perdas de solos na Bacia do Arroio Grande.

Ao estipular o volume total de solos perdidos, obtenho 437.129,57 toneladas por ano, o que me permite estipular também o volume médio de perdas de solos, que é de 12,36 toneladas/hectare/ano.

Classes de Perda de Solos	Área (Hectares)	Área (%)	Volume Total (Ton/Ano)
Até 2,5 ton/Ha	16.845,75	47,65	21.057,18
Entre 2,5 e 5 ton/ha	4.552,03	12,87	17.070,11
Entre 5 e 10 ton/ha	3.877,83	10,96	29.083,72
Entre 10 e 15 ton/ha	1.923,39	5,43	24.042,37
Entre 15 e 20 ton/ha	1.319,85	3,73	23.097,37
Entre 20 e 25 ton/ha	1.132,29	3,20	25.476,52
Entre 25 e 30ton/ha	998,64	2,83	27.462,60
Entre 30 e 40 ton/ha	1.316,79	3,72	46.087,65
Entre 40 e 50 ton/ha	683,84	1,95	30.772,80
Entre 50 e 75 ton/ha	816,32	2,31	51.020,00
Acima de 75 ton/ha	1.892,79	5,35	141.959,25
TOTAL	35.359,52	100%	437.129,57

Tabela 6.5 – Volume total de perdas de solos na Bacia do Arroio Grande.

Grande parte da Bacia do Arroio Grande (25.275,61 hectares, ou aproximadamente 72% do total da área) apresenta perdas de solos, que variam de 2,5 a 10 toneladas por hectare. Mesmo apresentando uma grande área percentual, o volume de perdas de solos é muito pequeno – cerca de 67.300 toneladas por ano, ou seja, em 72% do total da área ocorrem perdas de aproximadamente 15,40% do total do volume de solos perdidos no Arroio Grande. A perda média de solos nessa área é de 2,66 ton/ha/ano.

Nos outros 28% da área da Bacia do Arroio Grande, as perdas de solos são muito mais intensas, pois são perdidos aproximadamente 370.000 toneladas de solos por ano (equivale a 84,60% total de solos perdidos por ano). Essa perda de solos corresponde a uma média de 36,69 ton/ha/ano.

Visualmente, estabeleço algumas referências quanto a localização das áreas com maiores intensidades de perdas de solos. Estas se localizam principalmente em áreas agrícolas, como na várzea do Arroio Grande – com os cultivos de arroz irrigado, e no topo do Planalto Meridional – nas lavouras de soja. As áreas do Rebordo do Planalto apresentam menores perdas de solos, pois estas áreas são recobertas pelas florestas decíduas.

Autores como *Morgan (1986)*, apresentam dados de limites de perdas de solos, em uma determinada área, para que a elevada produtividade agrícola seja mantida. Na prática, é muito difícil estabelecer limites de tolerância de perdas de solos, pois é imprescindível, além de determinar o volume de solos perdidos, também se determinar as taxas de

formação dos solos. Estabelecidas essas duas variáveis, posso definir os limites de tolerância, pois este se baseia no balanço existente entre esses dois processos.

Morgan (1986) estabelece alguns limites de tolerância de perdas solos, em que os valores médios variam de 0,2 a 0,5⁵ kg/m²/ano, principalmente para solos pouco espessos ou muito suscetíveis aos processos erosivos. *Morgan (1986)* ainda estabelece limites de tolerância de 1,1 a 2,5 kg/m²/ano para áreas montanhosas e com totais pluviométricos elevados. Comparando esses limites de tolerância aos encontrados na Bacia do Arroio Grande, estabeleço que grande parte da área da bacia (72%) apresenta perdas normais, pois estas encontram-se entre os limites estabelecidos por *Morgan (1986)*. Do ponto de vista agrícola, a espessura do solos reduz-se muito lentamente, permitindo a manutenção da fertilidade dos solos. Porém, o restante da área (28%) apresenta perdas bastante elevadas, em médias que correspondem a 36,69 ton/ha/ano. Essa erosão acelerada acarreta grande redução de fertilidade dos solos, reduzindo a sua profundidade e espessura dos horizontes superficiais.

6.3. O PROCESSO DE VULNERABILIDADE AMBIENTAL DAS UNIDADES ECODINÂMICAS

Os ambientes naturais mostram-se, inicialmente em equilíbrio dinâmico. Ao avaliar a fragilidade dos ambientes naturais, utilizo as preposições de *Tricart (1977)* e *Ross (1994)*, que, em uma concepção ecológica, analisam o meio ambiente sob o prisma da Teoria de Sistemas das Unidades Ecodinâmicas. Os autores apontam que, na natureza, as trocas de energia se processam através de relações de equilíbrio dinâmico, e que esse equilíbrio dinâmico freqüentemente é alterado por intervenções humanas. Esse tipo de análise requer estudos inter-relacionados de relevo, solos, sub-solos, uso e cobertura da terra e clima.

O potencial de erodibilidade dos solos e a vulnerabilidade ambiental são estipulados através de Inferência *Fuzzy* - Processo Analítico

Hierárquico AHP. Neste procedimento, os diferentes fatores que serão analisados são comparados entre si através de um critério de importância relativa, conforme uma escala pré-definida, que varia de 1 a 9 (Igual importância – Máxima importância). Para tanto, cada parâmetro a ser avaliado receberá um valor de importância relativa que indicará a intensidade do processo erosivo.

O arranjo das classes de declividade, segundo Ross (1994), fica determinado na **Tabela 6.6**.

Categorias Hierárquicas	Classes de Declividade
Muito fraco	Ate 6%
Fraco	De 6 a 12%
Médio	De 12 a 20%
Forte	De 20 a 30%
Muito forte	Acima de 30%

Tabela 6.6 – Importância das classes de declividades nos processos erosivos.

Fonte: Ross (1994).

As classes de erodibilidade dos solos, segundo Ross (1994), considerando-se o escoamento superficial difuso e concentrado, podem ser agrupados conforme a **Tabela 6.7**.

Categorias Hierárquicas	Classes de solos
Muito fraco	Latossolo roxo, Latossolo Vermelho escuro e Vermelho amarelo de textura argilosa
Fraco	Latossolo Amarelo e Vermelho amarelo de textura média argilosa
Médio	Latossolo Vermelho amarelo, Terra Roxa, Terra Bruna, Solos Podzólicos Vermelho amarelo de textura média argilosa
Forte	Podzólico Vermelho amarelo de textura médio-arenosa e Cambissolos
Muito forte	Podzólicos, Litólicos e Areias Quartzosas

Tabela 6.7 – Importância dos tipos de solos na ocorrência de processos erosivos.

Fonte: Ross (1994).

A ocorrência de processos erosivos a partir das classes de uso e cobertura da terra obedece à classificação estabelecida conforme critérios de Ross (1994), sendo apresentada na **Tabela 6.8**.

Categorias Hierárquicas	Classes de uso da terra
Muito fraco	Florestas e matas naturais com biodiversidade
Fraco	Formações arbustivas naturais, matas secundárias, cerrados e capoeiras
Médio	Cultivos de ciclos longos, pastagens com baixo pisoteio de gado, silvicultura
Forte	Culturas de ciclo longo com baixa densidade, culturas de ciclo curto
Muito forte	Áreas desmatadas, solo exposto, agricultura não-conservacionista

Tabela 6.8 – Importância da cobertura vegetal nos processo erosivo.
Fonte: Ross (1994).

O processo erosivo em formações geológicas⁶ é apresentado na **Tabela 6.9**, considerando nas formações geológicas o grau de agregação das partículas e a resistência aos processos erosivos.

Categorias Hierárquicas	Classes de formações geológicas
Muito alto	Formação Aluvial
Alto	Formação Botucatu
Médio	Formação Rosário do Sul
Baixo	Basalto Serra Geral
Muito baixo	Riólito Serra Geral

Tabela 6.9 – Importância das formações geológicas no processo erosivo.

Este tipo de análise espacial representa valores contínuos, em que os dados são transformados para o espaço de referencia [0 ... 1] ou seja, de 0 a 100%, e processados por combinação numérica ou inferência *fuzzy*. Um conjunto deste tipo tem como característica a indefinição de fronteiras ou limiares entre as classes.

O principal objetivo ao estabelecer o zoneamento ambiental e a fragilidade potencial do meio natural corresponde à elaboração de um cenário preservacionista, que me permita selecionar áreas para reflorestamentos prioritários, dentro da perspectiva de reduzir a perda de água e de solos. No zoneamento ambiental, conforme **Figura 6.2**, a fragilidade do meio natural varia desde áreas “estáveis” até áreas com “instabilidade emergente”, em uma escala de [0 a 100%] de risco ambiental. A **Tabela 6.10** apresenta as classes de fragilidade ambiental, bem como o respectivo risco ambiental.

Classe de Zoneamento Ambiental	Risco Ambiental	Área	
		Hectares	(%)
Estável	Até 20%	4.788,22	13,55
Estabilidade Moderada	Entre 20 e 40%	12.748,80	36,06
Instabilidade Moderada	Entre 40 e 60%	7.199,00	20,36
Instável	Entre 60 e 80%	4.450,90	12,59
Instabilidade Emergente	Acima de 80%	6.172,60	17,44
Total	---	35.359,52	100

Tabela 6.10– Zoneamento ambiental da Bacia Hidrográfica do Arroio Grande.

O zoneamento ambiental, permite-me a partir deste momento, estabelecer as áreas de reflorestamentos prioritários. A seleção das áreas de reflorestamentos corresponde a construção de um cenário preservacionista. Com o intuito de reduzir o volume de água perdido por escoamento superficial e subsuperficial, e conseqüentemente reduzir a remoção de sedimentos (solos), selecionei áreas com maiores riscos ambientais e que não estão cobertas por vegetação de grande porte para serem povoadas com espécies florestais nativas e exóticas. A **Tabela 6.11** apresenta a quantificação das áreas de florestas existente e as áreas a serem reflorestadas.

Cenário Preservacionista	Área	
	Hectares	(%)
Florestas existentes	15.715,05	44,44
Reflorestamentos	4.517,70	12,78
Total	20.232,75	57,22

Tabela 6.11– Reflorestamentos propostos para a Bacia Hidrográfica do Arroio Grande.

Saliento que as áreas selecionadas para serem reflorestadas apresentam risco ambiental superior a 60%. Justifico esta escolha para satisfazer os 3.466,82 hectares, ou seja, 9,90% do total da área, estabelecidos para reflorestamentos para compensar a perda de água. Selecionei ainda as áreas estabelecidas como Áreas de Preservação Permanente pelo Código Florestal Brasileiro, mais especificamente ao longo das drenagens (30 metros). O caráter regulador hidráulico em bacias hidrográficas é dado pelas florestas, pois estas atuam, segundo *Platt et al*

(1987) através das seguintes formas: 1) pela estabilização das áreas críticas de beira de rios e córregos, principalmente com o desenvolvimento de um emaranhado radicular; 2) pela atuação como filtro controlador de fluxo de água, minerais e nutrientes; 3) pela redução do escoamento superficial e subsuperficial, com a conseqüente retenção de partículas de solos e sedimentos. Espacialmente, as áreas a serem reflorestadas podem ser visualizadas na **Figura 6.3**.

¹ Conforme *Costa e Matos (1997)*.

² Segundo *Guerra e Cunha (1999)*.

³ Como esse resultado corresponde a um índice médio de erosividade da chuva, o Fator R não apresenta unidade, ou seja, é um valor adimensional. *Righetto (1998)* informa que, geralmente os valores de erosividade da chuva são expressos em (MJ/ha)*(mm/h). A determinação desses valores corresponde a energia cinética da chuva, sendo um parâmetro de predição das perdas de solos.

⁴ *Apud Ward e Elliot (1995)*.

⁵ Os limites de tolerância estabelecidos por Morgan (1986) equivalem a variações entre 2 e 5 ton/ha/ano.

⁶ *Jurandy Ross (1994)* não considera diretamente, a influência dos processos erosivos nas formações geológicas. Nesse sentido, adaptei sua metodologia proposta, e analisei os dados espaciais de formação geológicas, com a intenção de avaliar a real potencialidade do meio natural. A fragilidade ambiental das formações geológicas foi adaptada de *Maciel Filho (1990)*.

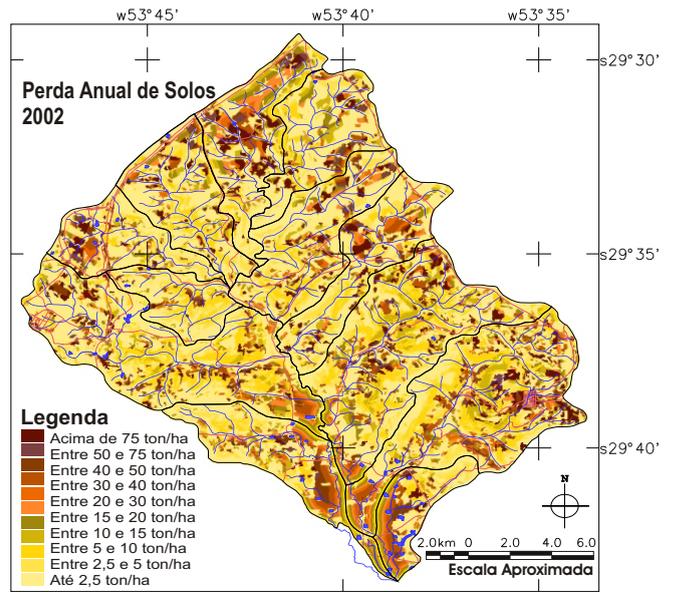


Figura 6.1

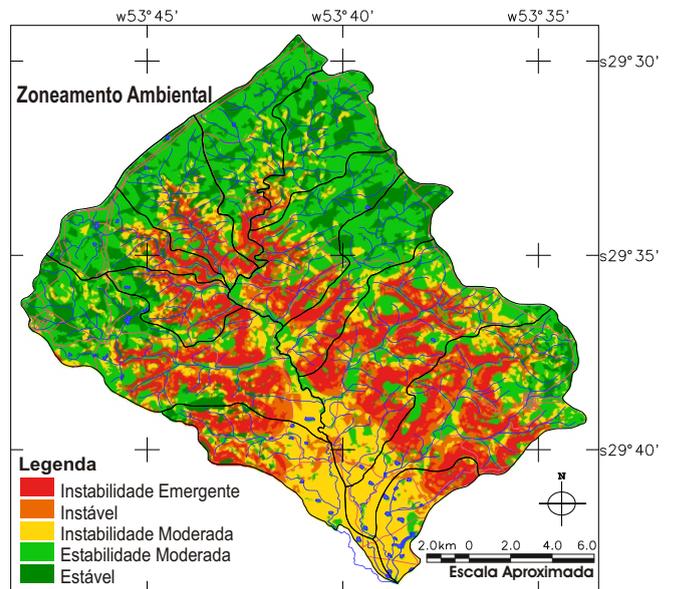


Figura 6.2

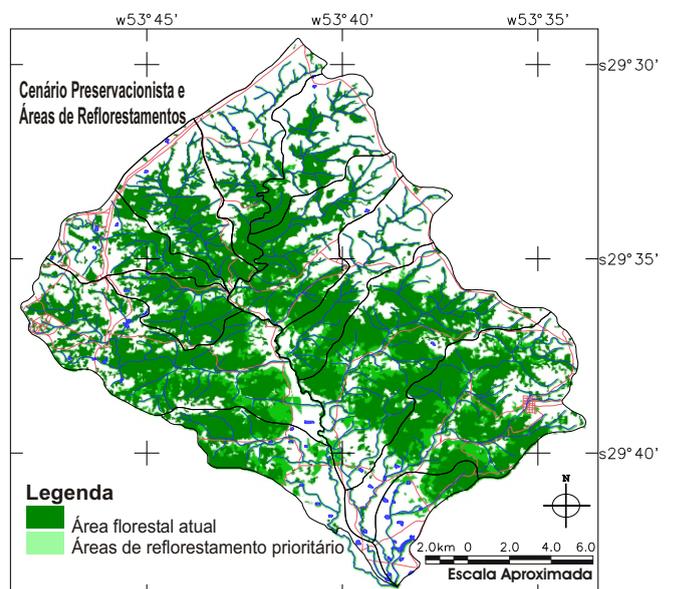


Figura 6.3

Figura 6.1 - Perdas anual de solos na Bacia do Arroio Grande.

Figura 6.2 - Zoneamento e fragilidade ambiental das unidades ecodinâmicas.

Figura 6.3 - Cenário preservacionista com áreas de reflorestamento prioritário.

7. ÁGUA: GERENCIAR PARA NÃO FALTAR

7.1 DINÂMICAS DE USO E COBERTURA DA TERRA

Segundo *Manuel Castells (1999)*, o espaço geográfico, atualmente, é organizado em um emaranhado sistema de redes, composto por “nós” que são interligados por “conexões”. Esse sistema de redes ocorre em todas as escalas de espaço, desde o espaço local até o espaço mundial. *Castells (1999)* expressa muito bem essa idéia ao se referir a “espaços de geometria variável”, ao explicar que, em muitas vezes as articulações materiais entre agentes econômicos e sociais ocorrem de forma independente localização espacial contínua.

Os “nós” são áreas polarizadoras e que exercem influência sobre as adjacências, mesmo que não haja contigüidade física. Esses “nós” são revelados principalmente pelo poder econômico, extremamente controlador dos fluxos financeiros, tecnológicos e sociais, e que funcionam como centros de tomadas de decisões, e por consequência, acabam afetando a organização do espaço geográfico. O fluxo das informações tecnocientíficas entre os “nós” define as “interconexões” sujeitando o espaço ao cenário nacional e internacional, e definindo sua principal aptidão, seja ela urbana, industrial ou agrícola. Nesse sentido, o espaço geográfico é controlado por atores, que muitas vezes estabelecem “regras

organizacionais”, que funcionam como os fatores ou motores da gestão territorial.

A partir dessa concepção, destaco alguns fatores dinâmicos que impulsionaram as mudanças de uso e cobertura de terra entre 1987 e 2002: 1) O crescimento urbano e o aumento populacional; e, 2) A expansão da superfície aberta para a exploração agropecuária.

Para explicar essas mudanças de uso e cobertura da terra na Bacia do Arroio Grande, recorro ao cenário agrícola nacional e regional. No Rio Grande do Sul, e mesmo no Brasil, o limitado avanço da divisão territorial do trabalho entre cidade e campo e entre as próprias cidades, faz com que uma grande parcela da população, que reside nos adensamentos populacionais dispersos no interior do estado e do país, ainda retire o seu sustento das atividades tipicamente rurais, seja na forma de lavouras de subsistência nas pequenas propriedades, seja nas relações de trabalho dos mais diversos matizes, normalmente não-assalariadas, nas médias e grandes explorações agropecuárias. Mesmo que o aumento populacional seja pouco significativo (o aumento populacional foi de 1.240 pessoas para 15 anos), a Bacia do Arroio Grande apresenta os reflexos do crescimento populacional de Santa Maria, principalmente no que se refere à exploração econômica deste espaço.

Outro motivo deve-se aos ganhos de rentabilidade nos principais cultivos agrícolas praticados em consequência da incorporação do progresso técnico nos tratamentos culturais. Segundo *Egler (2003)*, no Brasil os principais cultivos agrícolas obtiveram ganhos de produtividade no período considerado, sendo especialmente notável os ganhos obtidos nos cultivos de grãos, isto é, milho, soja e arroz. No caso do milho brasileiro, a produção aumentou 43,5% entre 1985 e 1996, enquanto a área colhida reduziu-se em 11,9%. A produção de soja aumentou 29,4%, mantendo em 1995/96 praticamente a mesma área colhida que 1985. A grande questão é que a agricultura passou por um processo de transformação em sua base técnica, em grande parte em consequência da necessidade de manter suas posições no mercado mundial.

Outra particularidade marcante é o avanço do agronegócio (*agribusiness*) em quase todo o complexo regional sul-brasileiro. As

produções de soja, de trigo, de milho, além de aves e de suínos, figuram entre os exemplos mais emblemáticos desse processo, não só pelas mudanças que trouxeram à paisagem agrícola, mas também por apresentar uma fortíssima dependência de insumos químicos, mecânicos e genéticos de origem industrial, bem como pelo destino igualmente industrial de boa parte da produção. Esses mesmos “gigantes” do agronegócio figuram ainda entre os maiores “consumidores” de recursos naturais dos ecossistemas da região sul, e em certos casos, promovem estragos ambientais de proporções da mesma forma, grandiosas.

A organização do espaço geográfico regional, incluindo-se aí a Bacia do Arroio Grande, obedece aos atores centrados nas figuras dos municípios de Santa Maria e Julio de Castilhos/Cruz Alta, e aos motivos por estes estabelecidos. O município de Santa Maria exerce influência principalmente na ocupação das áreas de várzea do Arroio Grande, pois estas são ocupadas principalmente com cultivos de arroz irrigado, e estando sujeito às corporações e cooperativas orizícolas que atuam na região. Já os municípios de Julio de Castilhos e Cruz Alta atuam, principalmente, na ocupação dos campos do Planalto Meridional, que estão inseridos no Complexo Agroindustrial da Soja, atuando principalmente em sistemas de corporações. Tal questão assume grande importância, pois nos anos de 2002 e 2003¹, o Rio Grande do Sul apresentou safras recordes de soja (juntamente com o aumento das exportações do produto).

As mudanças que ocorreram na Bacia do Arroio Grande espelham essas mudanças. Os avanços tecnológicos aplicados na agricultura fizeram com que as lavouras se deslocassem para as áreas mais planas e maiores potenciais, como no topo do Planalto Meridional e nas Planícies aluviais, com os cultivos de soja e arroz irrigado, respectivamente. Essa mudança causou o abandono das áreas agrícolas do Rebordo do Planalto, fazendo com que estas entrassem em processo de recuperação, com a formação de capoeirões e de florestas secundárias. Em contrapartida, o abandono de áreas impróprias para a agricultura também é fruto da (re) educação ambiental, e também pela atuação de organizações não-governamentais (ONG's) e comitês gestores de bacias hidrográficas, que buscam a preservação e a melhoria da qualidade ambiental.

7.2 O FEEDBACK DO CICLO HIDROLÓGICO

Em relação ao processo de simulação do ciclo hidrológico e de suas conseqüências, estabeleço algumas considerações entre a cobertura florestal e a realização de atividades agrícolas com o volume de água e de solos perdidos.

Uma análise mais detalhada da perda de solos por microbacia hidrográfica me permite estabelecer algumas correlações, principalmente com as atividades agrícola – e conseqüentemente com a cobertura vegetal, e com a perda de água em cada microbacia hidrográfica. A **Tabela 7.1** apresenta a correlação entre perdas de solos, uso e cobertura da terra e perdas de água por microbacia hidrográfica.

Microbacia	Área (ha)	Cobertura Florestal (%)	Atividades Agrícolas (%)	Perda de Água (%)	Média Perda Solos (ton/ha)
01	1.277,10	21,25	42,48	63,65	15,13
02	5.244,81	47,38	18,70	43,98	14,99
03	5.124,68	49,38	14,70	42,36	12,15
04	2.474,50	33,72	24,22	55,73	12,16
05	2.917,55	48,92	17,12	42,80	11,06
06	2.376,54	34,79	22,36	54,61	10,30
07	2.644,99	28,52	46,42	60,57	17,45
08	1.814,51	44,02	19,60	46,64	11,90
09	1.311,35	70,31	3,39	24,51	6,77
10	5.430,16	50,95	12,86	40,33	11,10
11	2.391,80	37,13	29,41	52,18	11,69
12	2.351,53	51,45	18,28	40,63	9,89
TOTAL	35.359,52	44,44	20,83	46,32	12,36

Tabela 7.1 – Relação entre uso e cobertura da terra, perdas de água e solos na Bacia do Arroio Grande.

As maiores perdas de água ocorrerem principalmente nas microbacias que apresentam as maiores taxas de ocupação agrícola, e que conseqüentemente possuem as menores áreas percentuais de cobertura florestal. Já os processos erosivos que ocorrem com o escoamento superficial e subsuperficial da água, não relacionam-se se diretamente com a cobertura florestal, mas principalmente com as práticas conservacionistas (não) adotadas nas lavouras agrícolas.

Com referência ao indicador susceptibilidade natural à erosão, verifico uma estreita vinculação com as características do relevo e com as práticas conservacionistas. Por sua vez, quanto à predisposição ao risco de erosão, observo um significativo aumento da ocorrência das categorias mais restritivas, neste caso, associadas às alterações verificadas no uso e cobertura da terra entre os cenários analisados.

A agricultura utiliza grande volume da água doce disponível na Bacia Hidrográfica do Arroio Grande. Na agricultura de irrigação seu consumo é bastante alto, somando-se a isso um grande volume de água desperdiçada em um sistema de irrigação pouco eficiente. Outro agravante da questão da água é a pequena cobertura florestal em locais estratégicos, como nas nascentes e nas áreas marginais do Arroio Grande. Os principais impactos são a diminuição da retenção de água no solo, o que acaba causando processos erosivos bastante intensos, assoreamento dos cursos d'água e esvaziamento do lençol freático. Essas são algumas das explicações para a ocorrência de enchentes bastante destrutivas em períodos de chuvas intensas, e secas severas, em períodos prolongados sem precipitações.

7.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Essa dissertação de mestrado oferece uma contribuição para a utilização em modelagem de sistemas ambientais, principalmente através da definição de arcabouços conceituais para a incorporação de múltiplas repercussões e múltiplas representações e apresentações geográficas. O

processo de modelagem ambiental, com bases nas representações matemáticas do ciclo hidrológico e das perdas de solos foi representado com a criação de um sistema de transformação e recuperação dos dados ambientais. Esses diagramas facilitam a implementação das aplicações, uma vez que não necessitam de novos desenvolvimentos, mas permitem a incorporação de dados para a recuperação das novas informações.

Considerando o caráter interdisciplinar das aplicações de Sensoriamento Remoto e de Sistemas de Informações Geográficas, a diversidade de conceitos é bastante evidente. Em particular, a “Ciência da Geoinformação” vem produzindo modelos matemáticos que muitas vezes são apropriados por diversos campos do conhecimento. A partir da criação de um sistema de modelagem, sua implementação é facilitada, já que tanto a estrutura do banco de dados quanto os métodos e funções necessários já estão especificados.

Aprender a modelar é antes de tudo, aprender a observar, a notar detalhes e a questionar. A questão dos recursos hídricos é, sem dúvida, fascinante e essencial para os dias de hoje, dada a necessidade cada vez maior de exploração do recurso. Hoje, essa exploração ainda vem sendo feita sem nenhum critério. A modelagem hidrológica surge como uma ferramenta capaz de antecipar acontecimentos e apontar alternativas que conduzam à manutenção da capacidade produtiva do ambiente. É dentro deste contexto que pretendi contribuir, principalmente no aumento do conhecimento a respeito dos processos hidrológicos e de suas conseqüências nas bacias hidrográficas.

A questão dos recursos hídricos no mundo é bastante crítica. Dados da organização internacional *World Resources Institute (2003)* indicam que de cada 10 litros de água doce utilizados pelo homem, 7 são utilizados em atividades agrícolas, e mais da metade dessa água é perdida em sistemas de irrigação ineficientes. O WRI também estima que 30% das bacias hidrográficas mundiais já perderam mais da metade de sua cobertura vegetal, e cerca de 40% da população mundial vive em regiões com escassez de água potável.

¹ Dados da Fundação de Economia e Estatística do Estado do Rio Grande do Sul, disponibilizados no site www.fee.tche.br.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA NACIONAL DAS ÁGUAS. *Hidroweb*. Disponível em: www.ana.gov.br. Acesso em: Maio/2004.

ARONOF, S. *Geographic Information Systems: A Management Perspective*. Ottawa: WDL Publications, 1995.

BARBOSA, C. C. F. *Álgebra de Mapas e suas Aplicações em Sensoriamento Remoto e Geoprocessamento*. Dissertação de Mestrado (Sensoriamento Remoto – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais). São José dos Campos, 1997.

BARBOSA, C. C. F. *et al. Manual de Referencia em LEGAL*. São José dos Campos: INPE, 2001. In: MONTEIRO, A. M. V. *et al. Introdução à Ciência da Geoinformação*. São José dos Campos: INPE. 2001.

BERTONI, J. e LOMBARDI NETO, F. *Conservação dos Solos*. Piracicaba: Livro Ceres, 1985. 392 p.

BLOOM, A. L. *Superfície da Terra*. São Paulo: Edgard Blucher, 1970. 184p.

BOBBA, A. G., SINGH, V. P., BENGTTSSON, L. Application of Environmental Models to different hidrological systems. In: *Ecological Modelling*, (125) 15 – 49, 2000.

BOTELHO, R. G. M. *et al. Erosão e conservação dos solos: conceitos temas e aplicações*. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1999.

BRENA, D. A. e LONGHI, S. J. Inventário Florestal da Quarta Colônia. In: ITAQUI, J. *Quarta Colônia – Inventário Técnico de Flora e Fauna*. Santa Maria: Condesus Quarta Colônia, 2002. 256 p.

BREWER, T. R. *et al.* Assessment of Erosion Hazard with the USLE and GIS: A Case Study of the Upper Ewaso Ng'iro North basin of Kenia. In: *Journal of Agriculture*, (2): 78-86. 2000.

BROSSEAU, M. (1999). Geografia, Práticas Discursivas e Ambiência Pós-Moderna. In: CASTRO, I. E. *et al.* *Redescobrimo o Brasil – 500 anos depois*. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil/FAPERJ, 1999.

BROWNER, C. M. *Watershed approach framework*. Washington: U. S. Environmental Protection Agency, 1996.

BULL, G. Ecosystem Modelling with GIS. In: *Environmental Management*. (18): 345 – 349, 1994.

BUNTING, B T. *Geografia do Solo*. Rio de Janeiro: Zahar, 1971.

BURCH, G. *et al.* Comparative hidrological behaviour of forested and cleared catchments in Southern Australia. In: *Journal of Hidrology*. (90): 19 - 42, 1987.

BURROGH, P. A. *Principles of Geographical Information Systems for Land Resources Assessment*. New York: Clarendon, 1986.

BURROUGH, P. A. Development of intelligent geographical information system. *International Journal of Geographical Information Systems*. (1): 1 – 11, 1992.

BURROUGH, P. A. e MCDONNELL, R. A. *Principles of Geographic Information Systems*. Oxford: Oxford University, 1998.

CÂMARA, G. *Modelos, Linguagens e Arquiteturas para Bancos de Dados Geográficos*. Tese de Doutorado (Computação Aplicada – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais). São José dos Campos, 1995.

CÂMARA, G. *et al.* *Anatomia dos sistemas de informações geográficas*. Campinas: UNICAMP, 1997. 197p.

CÂMARA, G. *et al.* *Análise Espacial de Dados Geográficos*. São José dos Campos: INPE, 2001.

CASTELLS, M. *A Sociedade em Rede*. São Paulo: Paz e Terra, 1999.

CHRISMAN, N. *Exploring the Geographic Information Systems*. New York: John Wiley e Sons, 1997. 288 p.

CHRISTOFOLETTI, A. Aplicabilidade do conhecimento geomorfológico nos projetos de planejamento. In: GUERRA, A. J. T. e CUNHA, S. B. *Geomorfologia: uma atualização de bases e conceitos*. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1998.

COMISSÃO MUNDIAL SOBRE MEIO AMBIENTE E DESENVOLVIMENTO. *Relatório Brundtland – Nosso Futuro Comum*. Rio de Janeiro: FGV, 1987.

CÓDIGO FLORESTAL BRASILEIRO. Lei nº 4771, de 15 de setembro de 1965. Institui o Código Florestal Brasileiro e dá outras providências. *Publicação eletrônica*. Disponível em: URLib: <www.ipef.br/legislacao/codigo.html> Acesso em: Março/2002.

COOKE, R. U. e DOORNKAMP, J. C. *Geomorphology in Environmental Management: a new introduction*. New York: Oxford University Press, 1990. 410 p.

CORDEIRO, J. P. *et al* (2001). Álgebra de Mapas. In: MONTEIRO, A. M. V. *et al*. *Introdução à Ciência da Geoinformação*. São José dos Campos: INPE. 2001.

COSTA, L. M. & MATOS, A. T. Impactos da erosão do solo em recursos hídricos. In: *Recursos Hídricos e desenvolvimento sustentável da agricultura*. Brasília: ABEAS, 1997.

COUCLELIS, H. Space, Time and Geography. In: GOODCHILD, D. *et al*. *Geographical Information Systems*. New York: John Wiley e Sons, 1999.

COX, E. *The fuzzy systems: handbook a practitioner guide to building, using and maintaining fuzzy systems*. London: London Academic Press, 1994.

CROSTA, A. P. *Processamento Digital de Imagens de Sensoriamento Remoto*. Campinas: Unicamp, 1999.

DANGERMOND, K. A Classification of Software Components Commonly Used in geographic Information Systems. In: *Intrductory Readings in GIS*. (?): 31 – 51, 1990.

DEMERS, M. N. *Fundamentals of Geographic Information Systems*. Nova York: John Wiley e Sons, 1999.

EARTH OBSERVATORY. *Remote Sensing and Vegetation Indexes*. Disponível em: <http://earthobservatory.nasa.gov>. Acesso em: Março/2004.

EGLER, C. A. G. *Mudanças de uso e cobertura da terra no Brasil*. Relatório técnico. Rio de Janeiro: LAGET/UFRJ, 2003. 51 p.

EINEDER, M. *et al.* The shuttle radar topography mission — a new class of digital elevation models acquired by spaceborne radar. In: *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, (57) 241 – 262, 2003.

ENGENHOFER, M. *et al.* Progress in Computational Methods for Representing Geographic Concepts. In: *International Journal of GIScience*, 1999.

ENGENHOFER (1995). *Object-oriented GIS: The Principles*. Mayne: NCGIA, 1995.

ENGENHOFER (1989). *Spatial Query Languages*. Tese de Doutorado. Mayne: University of Mayne, 1989.

ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. *Why watersheds*. Washington: U.S. Environmental Protection Agency, 1996.

FANG, J. H. Fuzzy logic and Geology. In: *Geotimes – News and Trends in Geoscience*. (42): 23 – 26, 1997.

FONSECA, L. M. G. *Processamento Digital de Imagens*. São José dos Campos: INPE, 2001.

GARCIA, S. *Florestamentos compensatórios para retenção de água em microbacias hidrográficas*. Dissertação de Mestrado (Engenharia Agrícola – Universidade Federal de Santa Maria). Santa Maria, 2002.

GOODCHILD, M. Geographical Information Systems. In: *International Journal of Geographical Information Systems*, (6): 35 – 45, 1992.

_____. A spatial analytical perspective on Geographical Information Systems. In: *International Journal of Geographical Information Systems*, (4): 327 – 334, 1987.

GROSVENOR, G. M. *Atlas of The World*. Washington: National Geographic Society, 1996.

GUERRA, A. J. T. Processos erosivos nas Encostas. In: GUERRA, A. J. T. & CUNHA, S. B. *Geomorfologia – Uma Atualização de Bases e Conceitos*. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1998.

GUERRA, A. J. T. & CUNHA, S. B. *Avaliação e perícia ambiental*. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1999.

_____. *Geomorfologia e Meio Ambiente*. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1996. 398p.

HARVEY, D. *Condição Pós-Moderna: uma pesquisa sobre as origens da mudança cultural*. São Paulo: Loyola, 1989. 349 p.

HE, C. Integration of geographic information systems and simulation model for watershed management. In: *Environmental Modelling & Software* (18): 809 – 813, 2003.

HIDALGO, P. *Curso de Manejo de Bacias Hidrográficas*. Florianópolis: CIDIAT, 1987.

HOBBSAWM, E. *A Era dos Extremos: O breve Século XX*. São Paulo: Companhia das Letras, 1999. 598 p.

IBGE@CIDADES. *IBGE@CIDADES*. Disponível em: www.ibge.gov.br. Acesso em: Março/2004.

IBGE. *Levantamentos de recursos naturais: folha SH.22 Porto Alegre e partes da folhas SH.21 Uruguaiana e SI.22 Lagoa Mirim*. Rio de Janeiro, 1986. IBGE. Projeto Radam Brasil. Rio de Janeiro: FIBGE, vol 33,1986.

INGEBRITSEN, S. E. e SANFORD, W. E. M *Groundwater in geologic processes*. Cambridge: Cambridge University Press, 1999. 341p.

INPE. *Manual do Usuário SPRING*. 2004. Disponível em: <http://www.dpi.inpe.br/spring/usuario/indice.htm>. Acesso em: Jan/2004.

ITAQUI, J. (2002). *Quarta Colônia – Inventário Técnico de Flora e Fauna*. Santa Maria: Condesus Quarta Colônia, 2002. 256 p.

JENSEN, J. R. *Introductory Digital Image Processing: A Remote Sensing Perspective*. New Jersey: Prentice Hall, 1986.

KERSTEN, R. *et al. Hidrology: water quantity and quality control*. 2ª Ed. New York: John Wiley e Sons Inc., 1997. 568 p.

LAMBLIN, E. F. *Modeling Deforestation Processes – A Review*. Luxembourg: European Commission for GIS and Remote Sensing, 1994.

LANNA, A. E. A inserção da gestão das águas na gestão ambiental. In: MUNOZ, H. R. (Org.) *A Interface da Gestão dos Recursos Hídricos*. Brasília: MMA, 2003. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/port/srh/acervo>. Acesso em: Dez/2003.

_____. *Gerenciamento de Bacias Hidrográficas: aspectos conceituais e metodológicos*. Brasília: IBAMA, 1995. 171p.

- MACIEL FILHO, C. L. *Carta Geotécnica de Santa Maria*. Santa Maria: UFSM, 1990. 28p.
- MARCHIORI, J. N. C. Florestas nativas privadas: uma análise fitogeográfica e histórica do problema no Rio Grande do Sul. In: *Anais do Seminário sobre a situação florestal do Rio Grande do Sul*. Porto Alegre: Secretaria da Agricultura do Estado do Rio Grande do Sul, 1996.
- MATHER, P. M. *Computer Processing of Remote Sensing Images*. New York: John Wiley e Sons, 1999.
- MEDEIROS, J. S. M. *Bancos de Dados Geográficos e Redes Neurais Artificiais: Tecnologias de Apoio a Gestão do Território*. Tese de Doutorado (Geografia – Universidade de São Paulo). São Paulo, 1999.
- MEDEIROS, J. S. e CÂMARA, G. Geoprocessamento para projetos Ambientais. In: MONTEIRO, A. M. V. et al. *Introdução a Ciência da Geoinformação*. São José dos Campos: INPE, 2001.
- MENDONÇA, F. Diagnóstico e análise ambiental de microbacias hidrográficas: proposição metodológica na perspectiva do zoneamento, planejamento e gestão ambiental. In: *Ra' e Ga*. (3): 67 – 89, 1999.
- MINISTERIO DA CIENCIA E TECNOLOGIA. *Diretrizes estratégicas para o fundo de recursos hídricos*. Brasília: C e T, 2001. 38p.
- MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. *Agenda 21*. Disponível em: www.mma.gov.br/agen21. Acesso em: Maio/2004.
- _____. *Recursos Hídricos no Brasil*. Brasília: C e T, 1998. Disponível em: www.mma.gov.br. Acesso em Março/2003.
- MONTEIRO, A. M. V. et al. Representações computacionais do espaço: um diálogo entre a Geografia e a Ciência da Geoinformação. In: MONTEIRO, A. M. V. et al. *Introdução à Ciência da Geoinformação*. São José dos Campos: INPE. 2001.
- MORGAN, R. P. C. *Soil Erosion & Conservation*. New York: Longman Inc., 1986.
- MULLER FILHO, I. L. *Notas Para o Estudo da Geomorfologia do Rio Grande do Sul*. Santa Maria: UFSM, 1970. 34p.
- MURCK, B. W.; SKINNER, B. J.; PORTER, S. C. *Environmental Geology*. New York: John Wiley & Sons, 1996.

NOVO, E. M. L. M. *Sensoriamento Remoto: Princípios e Aplicações*. São Paulo: Edgard Blucher, 1993.

_____. Proposta Metodológica para Geração de Imagens NDVI derivadas do AVHRR/NOAA-14. In: *Anais do Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*. São Paulo: Seção de Comunicações Técnico-Científicas, 1989.

ODUM, P. E. *Ecologia*. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 1988.

PLATT, W. S. *et al. Methods for evaluating riparian habitats with applications to management*. Washington: USDA (Forest Service General Technical Report), 1987.

POLÍTICA NACIONAL DOS RECURSOS HÍDRICOS. Lei n.º 9433, de janeiro de 1997. Institui a Política Nacional dos Recursos Hídricos e dá outras providências. *Publicação eletrônica*. Disponível em: www.mma.gov.br. Acesso em: Setembro/2002.

RAFFESTIN, C. *Por uma Geografia do Poder*. São Paulo: Ática, 1993. 269 p.

REICHERT, K. *Processos de Transferência Solo – Planta*. Campinas: Cargill, 1989.

RIGHETTO, A. M. *Hidrologia e Recursos Hídricos*. São Paulo: EESC/USP, 1998. p. 731 - 813.

ROSS, J. L. S. Análises e síntese na abordagem geográfica da pesquisa para o planejamento ambiental. In: *Revista do Departamento de Geografia (USP)*. (9): 63 – 75, 1995.

_____. Análise empírica da fragilidade ambiental dos ambientes naturais e antropizados. In: *Revista do Departamento de Geografia (USP)*. (6): 63 - 74. 1994.

SANTOS, M. *A natureza do espaço: Técnica e tempo, Razão e Emoção*. São Paulo: Hucitec, 1999. 308 p.

SCHROEDER, M. Cobertura Florestal do Rio Grande do Sul. In: *Anais do Seminário sobre a situação florestal do Rio Grande do Sul*. Porto Alegre: Secretaria da Agricultura do Estado do Rio Grande do Sul, 1993.

SHIMABUKURO, Y. E. *et al.* Índice de Vegetação e Modelo Linear de Mistura Espectral no monitoramento da região do Pantanal. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*. (33): 1729-1737, 1998.

SILVA, J. X. Geomorfologia e Geoprocessamento. In: GUERRA, A. J. T. e CUNHA, S. B. *Geomorfologia: uma atualização de bases e conceitos*. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1998.

SMITH, T. *et al.* (1987). Requirements and Principles for Implementation and Construction of Large-Scale GIS. In: *International Journal of Geographical Information Systems*. (1): 13 – 31, 1987.

SOARES, J. V. e RENNÓ, C. D. Conceitos de Modelagem Hidrológica. In: CÂMARA, G. e MONTEIRO, A. M. V. *Curso de Introdução à Modelagem Dinâmica*. Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. Belo Horizonte, 2003.

STRECK, E. V. *et al.* *Solos do Rio Grande do Sul*. Porto Alegre: UFRGS, 2002.

TOWNSEND, P. A. A Quantitative Fuzzy Approach to Assess Mapped Vegetation Classifications for Ecological Applications. In: *Remote Sensing for Environment*. (72): 253 – 267, 2000.

TRICART, J. *Ecodinâmica*. Rio de Janeiro: FIBGE, 1977.

TSAY, D. Delaunay Triangulations in TIN Creation. In: *International Journal of Geographical Information Systems*. (7): 501 – 524, 1993.

WARD, A. D. e ELLIOT, W. J. *Environmental Hydrology*. New York: Lewis Publishers, 1995.

WORLD RESOURCES INSTITUTE. *Water Resources and Freshwater Ecosystems*. Disponível em: <http://earthtrends.wri.org>. Acesso em: Dez/2003.